

ISSN 2949-6241

e-ISSN 2949-6233

Инженерные Технологии



№ 2 (6) 2024

16+

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 2 (6), 2024

16+

ENGINEERING TECHNOLOGIES

SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL

№ 2 (6), 2024

Главный редактор

Битюков Виталий Ксенофонтович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры «Информационные и управляющие системы» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), bitukovWK1941@yandex.ru

Заместители главного редактора

Карманова Ольга Викторовна – главный редактор рубрики «Химические технологии, науки о материалах», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии органических соединений и переработки полимеров» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), karolga@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2226-6582>

Тихомиров Сергей Германович – главный редактор рубрики «Информационные технологии и телекоммуникации», доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные и управляющие системы» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), tikhomirov_57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8192-0049>

Научно-редакционный совет:

Гусев Борис Владимирович – председатель научно-редакционного совета, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, член-корреспондент Российской академии наук, президент Российской инженерной академии (г. Москва, Россия), info-rae@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2718-9539>

Алтайлы Сагымбек, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология пищевых и перерабатывающих производств» Казахского Агротехнического университета им. Сакена Сейфуллина, академик Академии сельскохозяйственных наук Республики Казахстан (г. Астана, Казахстан)

Борейко Наталья Павловна, доктор технических наук, советник директора ФГУП «Научно-исследовательский институт синтетического каучука им. С.В. Лебедева» (г. Санкт-Петербург, Россия), boreicko.natalya@yandex.ru

Люсова Людмила Ромуальдовна, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Химия и технология переработки эластомеров имени Ф.Ф. Кошелева» Российского технологического университета МИРЭА (г. Москва, Россия), lyusova@mirea.ru

Матвейкин Валерий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Информационные процессы и управление» Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов, Россия), ipu_tstu@mail.ru

Мешалкин Валерий Павлович, академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Логистика и экономическая информатика» Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, (г. Москва, Россия), meshalkin.v.p@muctr.ru

Прокопчук Николай Романович, доктор химических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, профессор кафедры «Полимерные композиционные материалы», Белорусского государственного технологического университета (г. Минск, Беларусь), nrprok@gmail.com

Редакционная коллегия:

Рубрика «Информационные технологии и телекоммуникации»

Битюков Владимир Ксенофонтович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Радиоволновые процессы в технологии» Российского технологического университета МИРЭА, (г. Москва, Россия)

Благовещенская Маргарита Михайловна, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки, зав. кафедрой «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами» Московского государственного университета пищевых производств (г. Москва, Россия), mmb@mgupr.ru

Бурлуцкая Мария Шаукатовна, доктор физико-математических наук, доцент, декан математического факультета, зав. кафедрой «Математического моделирования» Воронежского государственного университета (г. Воронеж, Россия), deanery@math.vsu.ru

Василенко Виталий Николаевич, доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе, заведующий кафедрой «Машины и аппараты пищевых производств» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), ucheba@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1547-9814>

Дворецкий Станислав Иванович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки, профессор кафедры «Технология и оборудование пищевых и химических производств» Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов, Россия), bio-topt@yandex.ru

Зиятдинов Надир Низамович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системотехника» Казанского национального исследовательского технологического университета (г. Казань, Россия), ZiyatdinovNN@corp.knrtu.ru

Карпович Дмитрий Семенович, кандидат технических наук, доцент зав. кафедрой «Автоматизация производственных процессов и электротехника» Белорусского государственного технологического университета (г. Минск, Беларусь)

Колодежнов Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Общепрофессиональных дисциплин» Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж, Россия)

Колыбанов Кирилл Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные технологии» Российского технологического университета МИРЭА, (г. Москва, Россия)

Кущев Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, полковник, начальник кафедры «Автоматизация систем управления и информационная безопасность» Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж, Россия)

Лабутин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техническая кибернетика и автоматика» Ивановского химико-технологического университета (г. Иваново, Россия), lan@isuct.ru

Левданский Александр Эдуардович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Процессы и аппараты химических производств» Белорусского государственного технологического университета (г. Минск, Беларусь), alex_levdanskyy@mail.ru

Ли Юэен, доктор технических наук, доцент Шаньдунского университета архитектуры и технологии (г. Цзинань, Китай), 386093354@qq.com

Матвеев Михаил Григорьевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Информационных технологий управления» Воронежского государственного университета (г. Воронеж, Россия), mgmatveev@yandex.ru

Мищенко Сергей Владимирович, заслуженный деятель науки, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения» Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов, Россия), msv@tstu.ru

Муромцев Дмитрий Юрьевич, проректор по научной работе, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов, Россия), nauka@tstu.ru

Остриков Александр Николаевич, заслуженный деятель науки, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), kaf-pahpp@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2335-0017>

Подвальный Семен Леонидович, заслуженный деятель науки, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированные и вычислительные системы» Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия), spodvalny@yandex.ru

Провоторов Вячеслав Васильевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Уравнения в частных производных и теория вероятности» Воронежского государственного университета (г. Воронеж, Россия)

Семенов Михаил Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" (г. Воронеж, Россия), mkl150@mail.ru

Скрыпников Алексей Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационная безопасность» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), dekuits@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>

Тростянский Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Физика и химия» Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж, Россия)

Урбанович Павел Павлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы и технологии» Белорусского государственного технологического университета (г. Минск, Беларусь), p.urbanovich@belstu.by

Хаустов Игорь Анатольевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Информационные и управляющие системы» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), kaf-ius@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8897-5763>

Хвостов Анатолий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика и механика» Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия), khvtol1974@yandex.ru

Чертов Евгений Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования РФ, советник при ректорате, заведующий кафедрой «Техническая механика» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), post@vsuet.ru

Рубрика «Химические технологии, науки о материалах»

Ваниев Марат Абдурахманович, доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Химия и технология переработки эластомеров» Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, Россия), vaniev@vstu.ru

Дворецкий Дмитрий Станиславович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технология и оборудование пищевых и химических производств» Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов, Россия), bio-topt@yandex.ru

Дормекшин Олег Борисович, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Технология неорганических веществ и общая химическая технология» Белорусского государственного технологического университета (г. Минск, Беларусь), dormeshkin@yandex.ru

Иванов Леонид Алексеевич, кандидат технических наук, первый вице-президент, ученый секретарь Российской инженерной академии (г. Москва, Россия), L.a.ivanov@mail.ru

Кучменко Татьяна Анатольевна, доктор химических наук, профессор, профессор РАН, зав. кафедрой «Физическая и аналитическая химия» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), tak1907@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7812-9195>

Меньшутина Наталья Васильевна, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Химический и фармацевтический инжиниринг» Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева (г. Москва, Россия), menshutina.n.v@muctr.ru

Мокшина Надежда Яковлевна, доктор химических наук, доцент, профессор кафедры «Физика и химия» Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж, Россия), moksnad@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8409-024X>

Пугачева Инна Николаевна, доктор технических наук, доцент, профессор, и.о. заведующего кафедрой «Промышленной экологии и техносферной безопасности», декан факультета экологии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), fak-eh@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7812-9195>

Рудаков Олег Борисович, доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой «Химия и химическая технология материалов» Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия), rudakov@vgtasu.vrn.ru

Соколова Марина Дмитриевна, доктор технических наук, директор Института проблем нефти и газа СО РАН (ИПНГ СО РАН), обособленного подразделения ФГБУН Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр СО РАН» (Республика Саха (Якутия), Россия), marsokol@mail.ru

Суханов Павел Тихонович, доктор химических наук, профессор, советник при ректоре по научно-методической деятельности, профессор кафедры «Физическая и аналитическая химия» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), pts@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2588-9286>

Цзяньцян Юй, доктор технических наук, профессор лаборатории химии и материалов чистой энергии Университета Циндао (г. Циндао, Китай), jianqyu@qdu.edu.cn

Челноков Виталий Вячеславович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Логистика и экономическая информатика» Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, (г. Москва, Россия), chelnokov.v.v@muctr.ru

Официальный сайт журнала «Инженерные технологии»: <https://vsuet.ru/science/journal-engtech>

Ответственный секретарь: Носова Е. А. (эл. почта: engtech@vsuet.ru)

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций: Регистрационный номер ПИ № ФС77-83079 от 07 апреля 2022 г.

Адрес университета, редакции, издательства и отдела полиграфии ФГБОУ ВО «ВГУИТ»

394036, Воронеж, пр-кт Революции, д.19, ауд.445

Контактный тел.+7 (920) 228-20-11

E-mail: engtech@vsuet.ru

Подписано в печать 28.06.2024.

Выход в свет: 08.07.2024.

Формат 70x100 1/8

Усл. печ. л. 13,5. Тираж 100 экз. Заказ №

Цена - свободная

© ФГБОУ ВО

«Воронеж. гос. ун-т инж.
технол.», 2024

Editor-in-Chief

Bitukov Vitaly Ksenofontovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Professor of the Department of Information and Control Systems of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), bitukovWK1941@yandex.ru

Deputy Editors-in-Chief

Karmanova Olga Viktorovna – Editor-in-chief of the heading "Chemical Technologies, Materials Sciences", Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Technologies of Organic Compounds and Polymer Processing" Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), karolga@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2226-6582>

Tikhomirov Sergey Germanovich – Editor-in-chief of the section "Information Technologies and Telecommunications", Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Information and Control Systems" of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), tikhomirov_57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8192-0049>

Scientific and Editorial Board:

Gusev Boris Vladimirovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, President of the Russian Academy of Engineering (Moscow, Russia), info-rae@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2718-9539>

Altayuly Sagymbek, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of "Technology of food and processing industries" of the Kazakh Agrotechnical University. Sakena Seifullina, Academician of the Academy of Agricultural Sciences of the Republic of Kazakhstan (Astana, Kazakhstan)

Boreyko Natalia Pavlovna, Doctor of Technical Sciences, Advisor to the Director of the S.V. Lebedev Scientific Research Institute of Synthetic Rubber (St. Petersburg, Russia), boreyko.natalya@yandex.ru

Lyusova Lyudmila Romualdovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemistry and Technology processing of elastomers named after F.F. Koshelev" Russian Technological University MIREA (Moscow, Russia), lyusova@mirea.ru

Matveikin Valery Grigorievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Processes and Management, Tambov State Technical University (Tambov, Russia), ipu_tstu@mail.ru

Meshalkin Valery Pavlovich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Logistics and Economic Informatics of the D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (Moscow, Russia), meshalkin.v.p@muctr.ru

Prokopchuk Nikolay Romanovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor of the Department of Polymer Composite Materials, Belarusian State Technological University (Minsk, Belarus), nrprok@gmail.com

Editorial Board:

Heading "Information technology and telecommunications"

Bitukov Vladimir Ksenofontovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Radio Wave Processes in Technology" of the Russian Technological University MIREA, (Moscow, Russia)

Blagoveshchenskaya Margarita Mikhailovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist, Head of the Department "Automated Control Systems for Biotechnological Processes" of the Moscow State University of Food Production (Moscow, Russia), mmb@mgupp.ru

Burlutskaya Maria Shaukatovna, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Mathematics, Head of the Department of Mathematical Modeling at Voronezh State University (Voronezh, Russia), deanery@math.vsu.ru

Vasilenko Vitaliy Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, Head of the Department "Machines and Devices of Food Production" of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), ucheba@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1547-9814>

Dvoretzky Stanislav Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist, Professor of the Department of Technology and Equipment of Food and Chemical Industries of Tambov State Technical University (Tambov, Russia), bio-topt@yandex.ru

Ziyatdinov Nadir Nizamovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of "System Engineering" Kazan National Research Technological University (Kazan, Russia), ZiyatdinovNN@corp.knrtu.ru

Karpovich Dmitry Semenovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation of Industrial Processes and Electrical Engineering of the Belarusian State Technological University (Minsk, Belarus)

Kolodezhnov Vladimir Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of "General Professional Disciplines" of the Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (Voronezh, Russia)

Kolybanov Kirill Yuryevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Technology of the Russian Technological University MIREA, (Moscow, Russia)

Kushchev Sergey Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Colonel, Head of the Department "Automation of Systems management and Information Security" of the Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (Voronezh, Russia)

Labutin Alexander Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Cybernetics and Automation" of Ivanovo University of Chemical Technology (Ivanovo, Russia), lan@isuct.ru

Levdansky Alexander Eduardovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Processes and Devices of Chemical Production" of the Belarusian State Technological University (Minsk, Belarus), alex_levdansky@mail.ru

Li Yueyen, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Shandong University of Architecture and Technology (Jinan, China), 386093354@qq.com

Matveev Mikhail Grigoryevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Management Information Technologies at Voronezh State University (Voronezh, Russia), mgmatveev@yandex.ru

Mishchenko Sergey Vladimirovich, Honored Scientist, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechatronics and Technological Measurements of Tambov State Technical University (Tambov, Russia), msv@tstu.ru

Muromtsev Dmitry Yuryevich, Vice-Rector for Scientific Work, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Design of Radioelectronic and Microprocessor Systems" of Tambov State Technical University (Tambov, Russia), nauka@tstu.ru

Ostrikov Alexander Nikolaevich, Honored Scientist, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Technology of Fats, Processes and Devices of Chemical and Food Production" of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), kaf-pahpp@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2335-0017>

Podvalny Semyon Leonidovich, Honored Scientist, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automated and Computing Systems at Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia), spodvalny@yandex.ru

Provotorov Vyacheslav Vasilyevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Partial Differential Equations and Probability Theory at Voronezh State University (Voronezh, Russia)

Semenov Mikhail Evgenievich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Military Air Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin" (Voronezh, Russia), mkl150@mail.ru

Skrypnikov Alexey Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Security at Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), dekuits@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>

Trostyansky Sergey Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Physics and Chemistry of the Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy (Voronezh, Russia)

Urbanovich Pavel Pavlovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Systems and Technologies of the Belarusian State Technological University (Minsk, Belarus), p.urbanovich@belstu.by

Khaustov Igor Anatolyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information and Control Systems, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), kaf-ius@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8897-5763>

Khvostov Anatoly Anatolyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Mathematics and Mechanics of Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia), khvtol1974@yandex.ru

Chertov Evgeny Dmitrievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Advisor to the Rector, Head of the Department of Technical Mechanics of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), post@vsuet.ru

Heading "Chemical technologies, materials sciences"

Vaniev Marat Abdurakhmanovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Chemistry and Technology of Elastomer Processing at Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia), vaniev@vstu.ru

Dvoretzky Dmitry Stanislavovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Technology and Equipment of Food and Chemical Industries" of Tambov State Technical University (Tambov, Russia), bio-topt@yandex.ru

Dormekshin Oleg Borisovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Scientific Work, Head of the Department "Technology of Inorganic Substances and General Chemical Technology" of the Belarusian State Technological University (Minsk, Belarus), dormeshkin@yandex.ru

Ivanov Leonid Alexeyevich, Candidate of Technical Sciences, First Vice President, Scientific Secretary of the Russian Academy of Engineering (Moscow, Russia), L.a.ivanov@mail.ru

Kuchmenko Tatyana Anatolyevna, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Physical and Analytical Chemistry of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), tak1907@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7812-9195>

Menshutina Natalia Vasilyevna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering of the D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (Moscow, Russia), menshutina.n.v@muctr.ru

Mokshina Nadezhda Yakovlevna, Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Physics and Chemistry of the Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy (Voronezh, Russia), moksnad@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8409-024X>

Pugacheva Inna Nikolaevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Industrial Ecology and Technosphere Safety, Dean of the Faculty of Ecology and Chemical Technology, Voronezh State University of Engineering Technology (Voronezh, Russia), fak-eh@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7812-9195>

Rudakov Oleg Borisovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemistry and Chemical Technology materials of the Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia), rudakov@vgasu.vrn.ru

Sokolova Marina Dmitrievna, Doctor of Technical Sciences, Director of the Institute of Oil and Gas Problems SB RAS (IPNG SB RAS), a separate division of the Federal State Budgetary Educational Institution of the Federal Research Center "Yakut Scientific Center SB RAS" (Republic of Sakha (Yakutia), Russia), marsokol@mail.ru

Sukhanov Pavel Tikhonovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Advisor to the Rector for Scientific and Methodological Activities, Professor of the Department of Physical and Analytical Chemistry of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), pts@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2588-9286>

Jianqiang Yu, Doctor of Technical Sciences, Professor, Laboratory of Chemistry and Clean Energy Materials, Qingdao University (Qingdao, China), jianqiyu@qdu.edu.cn

Chelnokov Vitaly Vyacheslavovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Logistics and Economic Informatics, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, (Moscow, Russia), chelnokov.v.v@muctr.ru

The official website of the Engineering Technologies magazine: <https://vsuet.ru/science/journal-engtech>
Executive Secretary: Nosova E. A. (e-mail: engtech@vsuet.ru)

Founder: Voronezh State University of Engineering Technologies

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Communications: Registration number PI No. FS77-83079 dated April 07, 2022.

The address of the University, the editorial office, the publishing house and the printing department of VSUIT:

394036, Voronezh, Revolution Ave., 19, room 445

Contact tel.+7 (920) 228-20-11

E-mail: engtech@vsuet.ru

Signed to the press on 28.06.2024.

The publication: 08.07.2024.

Format 70 x 100 1/8

Usl. pech. l. 13,5. Edition of 100 copies. Order No.

Price - free

© FSBEI HE

«Voronezh State University of
Engineering and Technology»,
2024

СОДЕРЖАНИЕ

Информационные технологии и телекоммуникации

АКТУАЛЬНЫЕ УГРОЗЫ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОТИВОБОРСТВА <i>Пеливан М. А.</i>	15
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ <i>Основина О. Н., Бочаров Н. А.</i>	27
КОМПЕНСАЦИЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВАМИ ИМИТАЦИИ ФИЗИЧЕСКИХ НАГРУЗОК <i>Карпушкин С. В., Обухов А. Д., Сиухин А. А.</i>	36
ЧАТ-БОТ КАК ВИРТУАЛЬНЫЙ ПОМОЩНИК ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЯВОК НА ОБСЛУЖИВАНИЕ <i>Коробова Л. А., Новикова Ю. И.</i>	45
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ <i>Подвальный С.Л., Малюкова С.А.</i>	54
ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ УСТРАНЕНИЯ ОТКАЗОВ И НЕИСПРАВНОСТЕЙ В УЧЕБНО-ТРЕНИРОВОЧНЫХ СРЕДСТВАХ <i>Алексеев В. В., Свиридов М. А., Толстошеин Н. С., Шатских В. В.</i>	64
ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ <i>Попов А. П., Андрусенко А. С., Кисель Д. С.</i>	71
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СНИЖЕНИЯ РИСКА ТРАВМАТИЗМА ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА <i>Суровцев А. С.</i>	82

Химические технологии, науки о материалах

СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПАТЕНТЫ НА ГРАФЕН <i>Фиговский О. Л.</i>	86
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РЕЗИН, ПОЛУЧЕННЫХ В ПРИСУТСТВИЕ КОМПЛЕКСНЫХ АКТИВАТОРОВ ВУЛКАНИЗАЦИИ И УСКОРИТЕЛЕЙ РАЗНЫХ КЛАССОВ <i>Карманова О. В., Голякевич А. А., Меренкова Е. А., Благина А. Б.</i>	93
СВОЙСТВА РЕЗИН В ПРИСУТСТВИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ СОЛЕЙ ВЫСШИХ КАРБОНОВЫХ КИСЛОТ <i>Карманова О. В., Голякевич А. А., Острохижко Е. А., Хромина Е. А.</i>	100

CONTENTS

Information technology and telecommunications

CURRENT THREATS TO INFORMATION SECURITY IN COMPUTER WARFARE MODELING <i>Pelivan M. A.</i>	15
MODELING AND MEASUREMENT OF NOISE PARAMETERS OF BIPOLAR TRANSISTORS <i>Osnovina O. N., Bocharov N. A.</i>	27
COMPENSATION OF DELAY IN CONTROL SYSTEMS FOR PHYSICAL ACTIVITY SIMULATION DEVICES <i>Karpushkin S. V., Obukhov A. D., Siukhin A. A.</i>	36
CHAT-BOT AS A VIRTUAL ASSISTANT FOR GENERATING SERVICE REQUESTS <i>Korobova L. A., Novikova Y. I.</i>	45
CURRENT ISSUES IN INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS <i>Podvalny S. L., Malyukova S. A.</i>	54
FEATURES OF SIMULATION OF TECHNOLOGY FOR ELIMINATING FAILURES AND MALFUNCTIONS IN TRAINING FACILITIES <i>Alekseev V. V., Sviridov M. A., Tolstoshein N. S., Shatskih V. V.</i>	64
INFORMATION SYSTEM FOR MULTI-PARAMETER IDENTIFICATION OF TECHNOLOGICAL PROCESS <i>Popov A. P., Andrusenko A. S., Kisel D. S.</i>	71
INTELLIGENT INFORMATION SYSTEM INCREASING THE RELIABILITY OF ERGATIC SYSTEMS AND REDUCING THE RISK OF INJURY TO A HUMAN OPERATOR <i>Surovtsev A. S.</i>	82

Chemical technologies, materials sciences

MODERN RESEARCH & PATENTS ON GRAPHENE <i>Figovsky O.</i>	86
DEVELOPMENT OF COMPLEX FUNCTIONAL ADDITIVES FOR DIENE RUBBERS INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF RUBBERS OBTAINED ON THE CURING COMPLEX ACTIVATORS AND ACCELERATORS OF DIFFERENT CLASSES <i>Karmanova O. V., Golyakevich A. A., Merenkova E. A., Blagina A. B.</i>	93
PROPERTIES OF RUBBERS IN THE PRESENCE OF TECHNOLOGICAL ADDITIVES BASED ON ZINC CARBOXYLATES <i>Karmanova O. V., Golyakevich A. A., Ostrokhizhko E. A., Khromina E. A.</i>	100

Научная статья

УДК 004.03

**АКТУАЛЬНЫЕ УГРОЗЫ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИИ
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОТИВОБОРСТВА**

Михаил Анатольевич Пеливан[✉] ¹

witcher89158779996@yandex.ru

¹Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106/5, Тамбов, 392000, Россия

Аннотация. исследован процесс моделирования компьютерного противоборства на значимых объектах критической информационной инфраструктуры, осуществляющих выполнение технологических этапов транспортировки и сбыта электроэнергии. Показано, что при постанове задачи на моделирование систем и процессов, в частности процесса моделирования компьютерного противоборства, важное значение имеет задание ограничений для моделируемых объектов и процессов. Описан процесс определения ограничений по угрозам безопасности информации для значимых объектов критической информационной инфраструктуры с учетом, уже введенных ранее ограничений по субъектам и объектам критической информационной инфраструктуры. В ходе исследования определены множества актуальных негативных последствий угроз безопасности информации, актуальных объектов воздействия, актуальных источников угроз безопасности информации, актуальных способов реализации угроз безопасности информации и множество актуальных угроз безопасности информации. Определенные в рамках исследования ограничения позволяют уменьшить сложность разрабатываемой модели компьютерного противоборства на значимых объектах критической информационной инфраструктуры и тем самым повысить ее достоверность за счет сокращения описывающих объект исследования параметров.

Ключевые слова: критическая информационная инфраструктура, угрозы безопасности информации, модель угроз, моделирование, компьютерное противоборство, информационная безопасность.

Для цитирования: Пеливан М. А. Актуальные угрозы безопасности информации при моделировании компьютерного противоборства // Инженерные технологии. 2024. № 2 (6). С. 15-26.

Original article

**CURRENT THREATS TO INFORMATION SECURITY IN COMPUTER
WARFARE MODELING**

Mikhail A. Pelivan[✉] ¹

witcher89158779996@yandex.ru

¹Tambov State Technical University, Sovetskaya str., 106/5, Tambov, 392000, Russia

Abstract. The process of modeling computer warfare at significant objects of critical information infrastructure performing technological stages of transportation and distribution of electricity is considered. One of the initial stages of creating a computer warfare model is to set constraints for the simulated objects and processes. The process of determining restrictions on information security threats for significant objects of critical information infrastructure is described, considering previously introduced restrictions on subjects and objects of critical information infrastructure. In the course of this work, many relevant negative consequences of information security threats, many relevant objects of influence, many relevant sources of information security threats, many relevant ways to implement information security threats and many relevant information security threats were identified. The limitations defined in this work make it possible to reduce the complexity of the developed model of computer warfare on significant objects of critical information infrastructure and thereby increase its reliability by reducing the object of research (describing its parameters).

Keywords: critical information infrastructure, information security threats, threat model, modeling, computer warfare, information security.

For citation: Pelivan M. A. Current threats to information security in computer warfare modeling. *Ingenerye tehnologii* = Engineering technologies. 2024; (2 (6)): 15-26. (In Russ.).

Введение

Наиболее остро стоящей проблемой современности является обеспечение бесперебойного функционирования объектов критической информационной инфраструктуры (далее

– КИИ). Именно данные объекты обеспечивают поддержание обороноспособности государства, внутреннего правопорядка, а также стабильность и развитие в политической, экономической и социальной сферах.

Большое количество научных работ, направленных на исследования информационной безопасности КИИ, свидетельствует об значительной заинтересованности научного сообщества по отношению к данному направлению исследований. В своих работах исследователи обращают внимание на различные стороны обеспечения информационной безопасности КИИ, в частности на информационную безопасность объектов КИИ, основанных на работе технологии интернета вещей [1], управление рисками на объектах КИИ [2-4], а также на специфику проведения аудита информационной безопасности на объектах КИИ [5-7]. При этом выделяется большая группа работ, посвященных моделированию объектов КИИ [8-10], в том числе моделированию угроз [11-14] и нарушителей [15, 16], характерных для объектов КИИ, а также моделированию систем обеспечения информационной безопасности на данных объектах [17-20].

В связи с вышесказанным становится неоспоримой актуальность работ и исследований, направленных на обеспечение информационной безопасности КИИ, а также синтезирование моделей КИИ и разработки на их основе новых подходов и методов построения систем защиты информации, учитывающих особенности функционирования объектов КИИ.

На текущий момент моделирование – это один из самых эффективных методов исследования окружающих нас объектов и процессов, в том числе и процессов, связанных с обеспечением информационной безопасности. Но стоит отметить прямую зависимость количества взаимосвязанных параметров создаваемых моделей систем от уровня детализации таких моделей и сложности моделируемых систем [8].

Процесс компьютерного противоборства на объектах КИИ представляет собой сложный процесс с большим числом параметров и как следствие построение сложных моделей компьютерного противоборства. В связи с чем появляется необходимость в уменьшении сложности создаваемых моделей компьютерного противоборства и как следствие уменьшении ошибок, сложности исследований и интерпретации результатов.

Одним из способов снижения сложности создаваемых моделей компьютерного противоборства является введение ограничений, за счет которых уменьшается количество рассматриваемых параметров и диапазонов их значений. На предыдущих этапах данного исследования по разработке методов и моделей противодействия нарушителю информацион-

ной безопасности на объектах КИИ определены ограничения по субъектам и объектам КИИ, рассматриваемым в рамках проводимого исследования. Следующим этапом по определению ограничений для создаваемых моделей компьютерного противоборства является формирование модели угроз, то есть определение ограничений для проводимого исследования, основанных на особенностях угроз безопасности информации.

Таким образом, целью данной работы является увеличение адекватности разрабатываемой модели компьютерного противоборства на значимых объектах КИИ благодаря использованию результатов анализа предметной области и формирования границ применимости модели в части рассмотрения актуальных угроз безопасности информации с учетом введенных ранее ограничений по субъектам и объектам КИИ.

Материал и методы исследования

Модель компьютерного противоборства на значимых объектах КИИ представляется в виде

$$M_{CP} = f(M_{OB}, M_{UGR}, M_{SZ}),$$

где M_{CP} – модель компьютерного противоборства; M_{OB} – модель значимого объекта КИИ; M_{UGR} – модель угроз для значимого объекта КИИ; M_{SZ} – модель системы защиты значимого объекта КИИ.

Модель угроз для значимого объекта КИИ соответствует представлению угроз безопасности информации (далее – УБИ, UBI), представленному в Методике оценки угроз безопасности информации, утвержденной ФСТЭК России 5 февраля 2021 г. (далее – Методика ФСТЭК), имеет вид:

$$M_{UGR} = UBI(NP, OV, H, SR),$$

где M_{UGR} – модель угроз для значимого объекта КИИ; UBI – множество угроз безопасности информации; NP – множество негативных последствий от реализации УБИ; OV – множество объектов воздействия (далее – ОВ), H – множество источников УБИ; SR – множество способов реализации УБИ.

Так как основной целью проводимого исследования является недопущение негативных последствий от реализации УБИ, определение актуальных угроз, подлежащих дальнейшему исследованию, стоит начать с

установки ограничений по возможным негативным последствиям.

В соответствии с Методика ФСТЭК, а также моделями угроз безопасности информации значимых объектов КИИ, осуществляющих выполнение технологических этапов транспортировки и сбыта электроэнергии (далее – МУБ), среди всех типовых негативных последствий от реализации УБИ (далее – НПУБИ) выделяют три группы (вида риска (ущерба)):

- 1) ущерб физическому лицу (NP_{FL});
- 2) ущерб юридическому лицу, индивидуальному предпринимателю и хозяйственной деятельности (ущерб ЮЛ) (NP_{UL});
- 3) ущерб государству (NP_G).

Ущерб физическому лицу включает в себя 11 ($NP_{FL1} \dots NP_{FL11}$) возможных Типовых НПУБИ, описывающих последствия, которые могут затронуть людей, связанных с деятельностью субъектов КИИ и зависящих от работоспособности принадлежащих им объектов КИИ.

Ущерб ЮЛ включает в себя 25 ($NP_{UL1} \dots NP_{UL25}$) возможных Типовых НПУБИ, описывающих последствия, которые могут влиять на штатное функционирование внутренних процессов, привести к материальному и репутационному ущербу и прочее.

Ущерб государству включает в себя 29 ($NP_{G1} \dots NP_{G29}$) возможных Типовых НПУБИ, описывающих последствия, которые могут влиять на обороноспособность страны, поддержание правопорядка, а также поддержание стабильности в социальной, экономической, экологической и политической сферах деятельности.

Таким образом выделяется 65 возможных типовых НПУБИ и с учетом всех введенных обозначений, множество всех типовых НПУБИ последствий принимает вид:

$$NP = \{NP_{FL}\{NP_{FL1} \dots NP_{FL11}\}, NP_{UL}\{NP_{UL1} \dots NP_{UL25}\}, NP_G\{NP_{G1} \dots NP_{G29}\}\}.$$

Однако не все из них применимы к значимым объектам КИИ, осуществляющим выполнение технологических этапов транспортировки и сбыта электроэнергии (далее – Рассматриваемые объекты). Сокращение рассматриваемых негативных последствий позволит значительно сократить объект исследования и повысить достоверность создаваемых в дальнейшем моделей компьютерного противобор-

ства. На основе анализа функционирования Рассматриваемых объектов и МУБ, из всех НПУБИ были выбраны следующие актуальные НПУБИ:

1) ущерб ЮЛ (NP'_{UL}) (11 актуальных негативных последствий):

- нарушение законодательства (NP_{UL1});
- недополучение прибыли (NP_{UL2});
- выплата штрафов и/или компенсаций (NP_{UL3});
- необходимость закупки, замены и настройки вышедшего из строя оборудования (программного обеспечения) (NP_{UL4});
- нарушение штатного режима работы системы, объекта и/или процесса (NP_{UL5});
- затраты на восстановление деятельности (NP_{UL6});
- причинение имущественного ущерба (NP_{UL7});
- нарушение договорных обязательств (NP_{UL8});
- нарушение возможности решения задач и/или снижение эффективности решения задач (NP_{UL9});
- принятие неправильных решений (NP_{UL10});
- простой информационной системы или сети (NP_{UL11});

2) ущерб государству (NP'_G) (3 актуальных негативных последствия):

- прекращение или нарушение функционирования объектов обеспечения жизнедеятельности населения (NP_{G1});
- возникновение ущерба бюджетам (NP_{G2});
- незаконного использования вычислительных мощностей (NP_{G3}).

В результате проведенного анализа, множество Типовых НПУБИ сокращено до множества актуальных негативных последствий (NP') от реализации УБИ, подлежащих дальнейшему изучению, представленного в виде:

$$NP' = \{NP'_{UL}\{NP_{UL1} \dots NP_{UL11}\}, NP'_G\{NP_{G1} \dots NP_{G3}\}\}.$$

Еще одним параметром создаваемой модели компьютерного противоборства, определяющим границы моделируемой системы, является совокупность объектов воздействия.

В соответствии с Методикой ФСТЭК, МУБ, а также Базовой моделью угроз безопасности информации в интеллектуальных системах учета электрической энергии (мощности)

от 29.06.2021 (далее – БМУ) среди всех составляющих объектов КИИ, которые могут являться ОБ, выделяются следующие группы ОБ (GOV):

- информация (данные) (GOV_{INF});
- программно-аппаратные средства обработки и хранения информации (GOV_{PAS});
- программные средства (GOV_{PS});
- машинные носители информации (GOV_{MNI});
- телекоммуникационное оборудование (GOV_{TKO});
- средства защиты информации (GOV_{SZI});
- пользователи и интерфейсы взаимодействия (GOV_{PIV});
- обеспечивающие системы (GOV_{OS}).

Кроме того, ОБ характеризуются следующими видами воздействия (далее – ВВ, VV) на них:

- утечка информации (нарушение конфиденциальности) (VV_{NK});
- несанкционированная модификация, подмена, искажение защищаемой информации (нарушение целостности) (VV_{NC});
- отказ в обслуживании (нарушение доступности) (VV_{ND});
- несанкционированный доступ к компонентам и защищаемой информации (VV_{NDI});
- несанкционированное использование вычислительных ресурсов (VV_{NIR});
- нарушение функционирования средств обработки, передачи и хранения информации (VV_{NF}).

Также объекты воздействия определяют на следующих уровнях архитектуры (UA) рассматриваемых объектов:

- пользовательский уровень (UA_{POL});
- прикладной уровень (UA_{PRI});
- системный уровень (UA_{SIS});
- сетевой уровень (UA_{SET});
- аппаратный (физический) уровень (UA_{APP}).

Таким образом выделяется 8 групп ОБ, 6 ВВ на них и 5 уровней архитектуры рассматриваемых объектов на которых определяются ОБ. С учетом всех введенных обозначений, множество групп объектов воздействия имеет вид:

$$GOV = \{GOV_{INF}, GOV_{PAS}, GOV_{PS}, GOV_{MNI}, GOV_{TKO}, GOV_{SZI}, GOV_{PIV}, GOV_{OS}\},$$

множество уровней архитектуры Рассматриваемых объектов имеет вид:

$$UA = \{UA_{POL}, UA_{PRI}, UA_{SIS}, UA_{SET}, UA_{APP}\},$$

множество видов воздействия на объекты воздействия имеет вид:

$$VV = \{VV_{NK}, VV_{NC}, VV_{ND}, VV_{NDI}, VV_{NIR}, VV_{NF}\},$$

множество всех объектов воздействия имеет вид:

$$OV = \{GOV(VV(UA))\} = \{OV_1, \dots, OV_{40}\}$$

Однако в рамках Рассматриваемых объектов не все группы объектов функционируют на всех уровнях архитектуры объектов КИИ. Кроме того, не все виды воздействий применимы к тем или иным объектам воздействия. Определение соответствия между группами объектов воздействия и видами воздействия на них для каждого уровня архитектуры Рассматриваемых объектов позволит значительно сократить объем исследования и повысить достоверность создаваемых в дальнейшем моделей. Перечень актуальных групп объектов воздействия угроз безопасности, определенных для Рассматриваемых объектов и соответствующих им видов воздействия на них для каждого уровня архитектуры Рассматриваемых объектов, сформированный на основе анализа функционирования Рассматриваемых объектов, МУБ и БМУ, приведен в таблице.

В результате проведенного анализа, множество всех объектов воздействия сокращено до множества актуальных объектов воздействия (OV'), подлежащих дальнейшему изучению, представленного в виде:

$$OV' = \{OV_1, OV_3, OV_7, OV_9, OV_{12}, OV_{14}, OV_{15}, OV_{17}, OV_{20}, OV_{22}, OV_{23}, OV_{25}, OV_{26}, OV_{28}, OV_{29}, OV_{30}, OV_{31}, OV_{33}, OV_{34}, OV_{35}, OV_{36}, OV_{37}, OV_{39}, OV_{40}\}.$$

Неотъемлемой частью создаваемой модели компьютерного противоборства, являются источники УБИ (далее – Нарушители).

В соответствии с Методикой ФСТЭК, МУБ и БМУ, выделяются следующие виды Нарушителей (VN):

- специальные службы иностранных государств (VN_{SS});
- террористические, экстремистские группировки (VN_{TG});
- преступные группы (криминальные структуры) (VN_{PG});
- отдельные физические лица (хакеры) (VN_{FL});
- конкурирующие организации (VN_{KO});

Таблица. Перечень актуальных групп объектов воздействия угроз безопасности и соответствующих им видов воздействий

Table. List of relevant groups of objects affected by security threats and their corresponding types of impacts

№ п/п	Уровень архитектуры	Группа объектов воздействия	Виды воздействия
OV ₁	Пользовательский	Информация (данные)	VV _{NDI} ; VV _{NC}
OV ₂		Программно-аппаратные средства обработки и хранения информации	Отсутствуют
OV ₃		Машинные носители информации	VV _{NDI}
OV ₄		Программные средства	Отсутствуют
OV ₅		Телекоммуникационное оборудование	Отсутствуют
OV ₆		Средства защиты информации	Отсутствуют
OV ₇		Пользователи и интерфейсы взаимодействия с ними	VV _{NDI}
OV ₈		Обеспечивающие системы	Отсутствуют
OV ₉	Прикладной	Информация (данные)	VV _{NDI} ; VV _{NC}
OV ₁₀		Программно-аппаратные средства обработки и хранения информации	Отсутствуют
OV ₁₁		Машинные носители информации	Отсутствуют
OV ₁₂		Программные средства	VV _{NDI}
OV ₁₃		Телекоммуникационное оборудование	Отсутствуют
OV ₁₄		Средства защиты информации	VV _{NDI}
OV ₁₅		Пользователи и интерфейсы взаимодействия с ними	VV _{NDI}
OV ₁₆		Обеспечивающие системы	Отсутствуют
OV ₁₇	Системный	Информация (данные)	VV _{NDI} ; VV _{NC}
OV ₁₈		Программно-аппаратные средства обработки и хранения информации	Отсутствуют
OV ₁₉		Машинные носители информации	Отсутствуют
OV ₂₀		Программные средства	VV _{NDI} ;
OV ₂₁		Телекоммуникационное оборудование	Отсутствуют
OV ₂₂		Средства защиты информации	VV _{NDI}
OV ₂₃		Пользователи и интерфейсы взаимодействия с ними	VV _{NDI}
OV ₂₄		Обеспечивающие системы	Отсутствуют
OV ₂₅	Сетевой	Информация (данные)	VV _{NDI} ; VV _{NC}
OV ₂₆		Программно-аппаратные средства обработки и хранения информации	VV _{NDI} ; VV _{ND} ; VV _{NIR} ; VV _{NF}
OV ₂₇		Машинные носители информации	Отсутствуют
OV ₂₈		Программные средства	VV _{NDI}
OV ₂₉		Телекоммуникационное оборудование	VV _{NDI}
OV ₃₀		Средства защиты информации	VV _{NDI}
OV ₃₁		Пользователи и интерфейсы взаимодействия с ними	VV _{NDI}
OV ₃₂		Обеспечивающие системы	Отсутствуют
OV ₃₃	Аппаратный (физический)	Информация (данные)	VV _{NDI} ; VV _{NC}
OV ₃₄		Программно-аппаратные средства обработки и хранения информации	VV _{NDI} ; VV _{ND} ; VV _{NIR} ; VV _{NF}
OV ₃₅		Машинные носители информации	VV _{NDI}
OV ₃₆		Программные средства	VV _{NDI}
OV ₃₇		Телекоммуникационное оборудование	VV _{NDI}
OV ₃₈		Средства защиты информации	Отсутствуют
OV ₃₉		Пользователи и интерфейсы взаимодействия с ними	VV _{NDI}
OV ₄₀		Обеспечивающие системы	VV _{NDI}

- разработчики программных, программно-аппаратных средств (VN_{RAZ});
- лица, обеспечивающие поставку программных, программно-аппаратных средств, обеспечивающих систем (VN_{PSR});

- поставщики услуг связи, вычислительных услуг (VN_{PU});
- лица, привлекаемые для установки, настройки, испытаний, пусконаладочных и иных видов работ (VN_{PL});

- лица, обеспечивающие функционирование систем и сетей или обеспечивающих систем (администрация, охрана, уборщики и др.) (VN_{OL});
- авторизованные пользователи систем и сетей (VN_{AP});
- системные администраторы и администраторы безопасности (VN_{SA});
- бывшие (уволненные) работники (пользователи) (VN_{BR}).

В зависимости от уровня и условий доступа к компонентам систем объектов КИИ Нарушители подразделяются на следующие категории (KN):

- внешних Нарушителей (KN_{VNSH}) – не обладающих доступом в контролируемую зону;
- внутренних Нарушителей (KN_{VNT}) – обладающих доступом в контролируемую зону.

В зависимости от уровня возможностей (UV) выделяют Нарушителей, обладающих:

- базовыми возможностями (UV_B);
- базовыми повышенными возможностями (UV_{BP});
- средними возможностями (UV_{SR});
- высокими возможностями (UV_V).

Таким образом выделяется 13 видов Нарушителей, 2 категории Нарушителей и 4 уровня возможностей Нарушителей. С учетом всех введенных обозначений, множество видов Нарушителей имеет вид:

$$VN = \{VN_{SS}, VN_{TG}, VN_{PG}, VN_{FL}, VN_{KO}, VN_{RAZ}, VN_{PSR}, VN_{PU}, VN_{PL}, VN_{OL}, VN_{AP}, VN_{SA}, VN_{BR}\},$$

множество категорий Нарушителей имеет вид:

$$KN = \{KN_{VNSH}, KN_{VNT}\},$$

множество уровней возможностей Нарушителей имеет вид:

$$UV = \{UV_B, UV_{BP}, UV_{SR}, UV_V\},$$

множество параметров Нарушителей имеет вид:

$$H = \{VN(UV(KN))\}.$$

Выделение актуальных Нарушителей и как следствие их сокращение позволит значительно сократить объект исследования и повысить достоверность создаваемых в дальнейшем моделей. На основе анализа функционирования Рассматриваемых объектов, Методики ФСТЭК, МУБ и БМУ, из всех Нарушителей

были выбраны наиболее актуальные Нарушители в результате чего множество видов Нарушителей сокращено до множества актуальных видов Нарушителей (VN'), подлежащих дальнейшему изучению, представленного в виде:

$$VN' = \{VN_{SS}, VN_{TG}, VN_{PG}, VN_{FL}, VN_{PSR}, VN_{PU}, VN_{PL}, VN_{OL}, VN_{AP}, VN_{SA}, VN_{BR}\}.$$

Множество актуальных категорий Нарушителей (KN'), имеет вид:

$$KN = KN' = \{KN_{VNSH}, KN_{VNT}\}.$$

Множество уровней возможностей Нарушителей, сокращено до множества актуальных уровней возможностей Нарушителей (UV'), представленного в виде:

$$UV' = \{UV_B, UV_{BP}, UV_V\}.$$

Таким образом множество актуальных параметров Нарушителей (H') имеет вид:

$$H' = \{VN'(UV'(KN'))\}.$$

В зависимости от условий и возможностей Нарушителей могут применяться различные способы реализации УБИ. В соответствии с МУБ и БМУ, выделяются следующие основные способы реализации УБИ (SR):

- использование уязвимостей (SR_{IU});
- внедрение вредоносного программного обеспечения (SR_{VPO});
- использование недеklarированных возможностей (SR_{NV});
- установка закладок (SR_{UZ});
- формирование и использование скрытых каналов передачи данных (SR_{SKP});
- перехват побочных электромагнитных излучений и наводок (SR_{PEMIN});
- инвазивные способы доступа к конфиденциальной информации (SR_{IS});
- нарушение безопасности при поставках, услуг по установке, настройке, испытаниям, пусконаладочным работам (SR_{PU});
- ошибочные действия в ходе создания и эксплуатации объектов КИИ (SR_{OD}).

Таким образом выделяется 9 основных способов реализации УБИ. С учетом всех введенных обозначений, множество основных способов реализации УБИ имеет вид:

$$SR = \{SR_{IU}, SR_{VPO}, SR_{NV}, SR_{UZ}, SR_{SKP}, SR_{PEMIN}, SR_{IS}, SR_{PU}, SR_{OD}\}.$$

На основе анализа возможностей актуальных Нарушителей, МУБ и БМУ выделены

актуальные способы реализации УБИ, множество которых имеет вид:

$$SR' = \{SR_{IU}, SR_{VPO}, SR_{NV}, SR_{UZ}, SR_{SKP}, SR_{PU}, SR_{OD}\}.$$

Таким образом модель угроз для Рассматриваемых объектов, учитывающая множество актуальных УБИ (UBI') имеет вид:

$$M'_{UGR} = UBI'(NP', OV', H', SR').$$

На основе определенных в рамках данной работы актуальных НПУБИ, ОВ, Нарушителей и способов реализации УБИ проведен анализ УБИ, представленных в Банке данных угроз безопасности информации ФСТЭК России (далее – БДУ) и выявлено множество актуальных для Рассматриваемых объектов УБИ. В результате из 222 УБИ представленных в БДУ актуальными являются 94 УБИ.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ Методики ФСТЭК, МУБ и БМУ позволил выделить актуальные множества параметров, характеризующие УБИ и их реализацию для Рассматриваемых объектов, тем самым сократив объект исследования. Схема выбора ограничений по модели угроз представлена на рисунке.

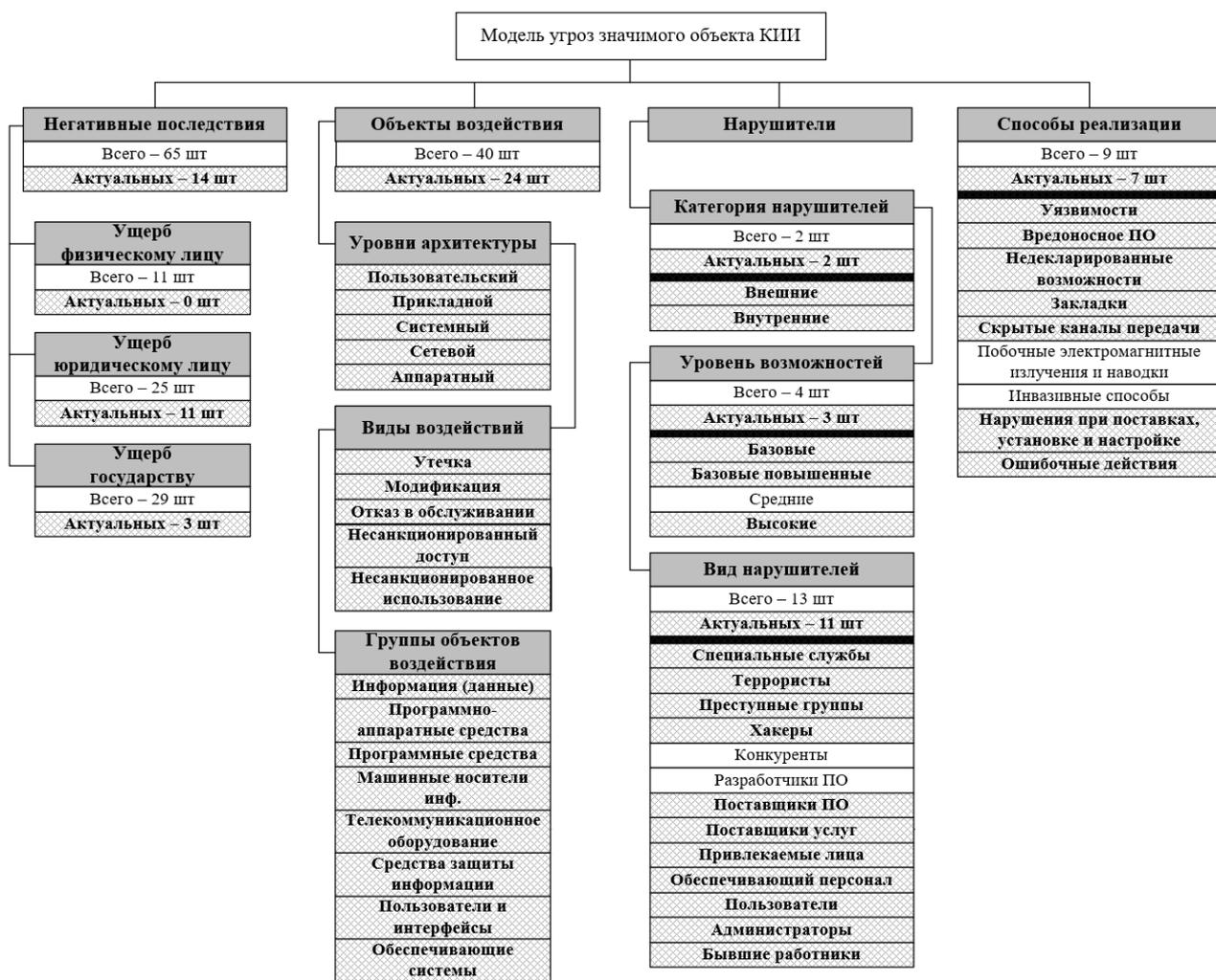


Рисунок. Схема выбора ограничений по модели угроз

Figure. Scheme for selecting constraints according to the threat model

В рамках анализа возможных НПУБИ выявлено, что для Рассматриваемых объектов актуальными являются 14 НПУБИ из 65 возможных.

В рамках анализа объектов воздействия выявлено, что несмотря на отсутствие неактуальных параметров, характеризующих объекты воздействия, из 40 комбинаций данных параметров, полноценно описывающих каждый

объект воздействия, только 24 являются актуальными в рамках исследования Рассматриваемых объектов.

В рамках анализа Нарушителей выявлено, что для Рассматриваемых объектов актуальными являются все категории Нарушителей, 3 из 4 уровня возможностей Нарушителей и 11 из 13 видов Нарушителей.

В рамках анализа способов реализации УБИ выявлено, что для Рассматриваемых объектов актуальными являются 7 способов реализации УБИ из 9 возможных.

Описанные выше результаты являются ожидаемыми, так как введение ограничений на исследуемый объект влечет за собой уменьшение актуальных объектов воздействия и соответственно актуальных НПУБИ, уменьшается заинтересованность Нарушителей, вариативность реализаций УБИ и как следствие количество актуальных УБИ.

Выводы

Начальным этапом проведения исследований, обеспечивающих получение точных и достоверных результатов, является введение

ограничений. В ходе данной работы сформулированы ограничения УБИ для проведения исследований и построения модели компьютерного противоборства на значимых объектах КИИ, осуществляющих выполнение технологических этапов транспортировки и сбыта электроэнергетики.

Определенные в рамках данной работы ограничения позволяют уменьшить сложность разрабатываемой модели компьютерного противоборства на значимых объектах КИИ и тем самым повысить ее достоверность за счет сокращения объекта исследования (описывающих его параметров).

Таким образом дальнейшие исследования направлены на изучение аспектов компьютерного противоборства на значимых объектах КИИ с учетом выделенных актуальных НПУБИ, ОВ, Нарушителей, способов реализации УБИ и УБИ.

Литература

1. Бобков, Е.О. Обеспечение информационной безопасности критической информационной инфраструктуры с ИТ-технологиями / Е. О. Бобков, Е. А. Балашова, Д. Н. Панин // Экономика и общество: перспективы развития : Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции, Сызрань, 14 мая 2020 года. Том Выпуск 4. – Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2020. – С. 221-225. – EDN NGYUHV.
2. Бакулин, М.А. Управление рисками нарушения информационной безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры / М. А. Бакулин // Системная инженерия и информационные технологии. – 2023. – Т. 5, № 5(14). – С. 78-87. – DOI 10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no5-p78. – EDN CRVUZJ.
3. Анализ и управление рисками информационной безопасности объекта критической информационной инфраструктуры / А.М. Гельфанд, В.В. Сигачева, А.В. Архипов, Л. К. Сиротина // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2023. – № 3. – С. 21-27. – DOI 10.46418/2079-8199_2023_3_3. – EDN BKGRAY.
4. Вульфин, А.М. Модели и методы комплексной оценки рисков безопасности объектов критической информационной инфраструктуры на основе интеллектуального анализа данных : специальность 23.60.00 : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Вульфин Алексей Михайлович, 2022. – 386 с. – EDN AUONHT.
5. Гильманова, Э.А. Особенности проведения аудита информационной безопасности объектов критической информационной инфраструктуры в топливно-энергетическом комплексе / Э. А. Гильманова, Р. И. Ахметшина // Форум молодых ученых. – 2022. – № 2(66). – С. 29-33. – DOI 10.46566/2500-4050_2022_66_29. – EDN OCSPNA.

6. Смирнов, Г.Е. Актуальные вопросы развития теории и практики аудита информационной безопасности объектов критической информационной инфраструктуры / Г. Е. Смирнов, С. И. Макаренко // Проблемы комплексной безопасности Каспийского макрорегиона : Сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции, Астрахань, 28–29 октября 2021 года / Под общей редакцией А.П. Романовой, Д.А. Черничкина. – Астрахань: Астраханский государственный университет, Издательский дом "Астраханский университет", 2021. – С. 148-157. – EDN MSQRDC.

7. Гильманова, Э.А. Роль аудита информационной безопасности в жизненном цикле системы обеспечения информационной безопасности объектов критической информационной инфраструктуры / Э. А. Гильманова, Р. И. Ахметшина // Форум молодых ученых. – 2022. – № 2(66). – С. 34-37. – DOI 10.46566/2500-4050_2022_66_34. – EDN LACJED.

8. Язов, Ю.К. Моделирование значимых объектов критической информационной инфраструктуры в интересах исследования защищенности применяемых в них информационных технологий / Ю. К. Язов, С. В. Соловьев // Безопасные информационные технологии : Сборник трудов Одиннадцатой международной научно-технической конференции, Москва, 06–07 апреля 2021 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (Москва), 2021. – С. 363-369. – EDN LSOBLP.

9. Кочнев, С.В. Синтез структуры объектов критической информационной инфраструктуры производственных процессов на основе марковских моделей / С.В. Кочнев, А.П. Лапсарь, А.В. Барабошкина // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2022. – № 1(57). – С. 93-105. – DOI 10.54398/2074-1707_2022_1_93. – EDN QFRGKT.

10. Кубарев, А.В. Синтез модели объекта критической информационной инфраструктуры для безопасного функционирования технической системы в условиях деструктивного информационного воздействия / А.В. Кубарев, А.П. Лапсарь, А.А. Асютиков // Вопросы кибербезопасности. – 2020. – № 6(40). – С. 48-56. – DOI 10.21681/2311-3456-2020-06-48-56. – EDN FNBHMN.

11. Новикова, Е.Ф. Разработка модели угроз для объектов критической информационной инфраструктуры с учетом методов социальной инженерии / Е.Ф. Новикова, В.Н. Хализев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2019. – № 4(48). – С. 127-135. – DOI 10.21672/2074-1707.2019.48.4.127-135. – EDN IWFVWY.

12. Овчаров, В.А. Формальная модель угроз кибербезопасности объектов критической информационной инфраструктуры / В.А. Овчаров, А.В. Харжевская // Космонавтика и ракетостроение. – 2021. – № 3(120). – С. 131-142. – EDN NJYNDR.

13. Василенко, В. В. Модель угроз компьютерных атак на цифровую иерархию объектов критической информационной инфраструктуры / В. В. Василенко, С.М. Климов, О.А. Палухин // Военная безопасность России: взгляд в будущее : Материалы 8-й Международной межведомственной научно-практической конференции научного отделения № 10 Российской академии ракетных и артиллерийских наук. В 3-х томах, Москва, 16 марта 2023 года. – Москва: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2023. – С. 194-201. – EDN YVYMEQ.

14. Тихомирова, А. А. Формальное описание моделирования угроз безопасности информации по методике ФСТЭК / А. А. Тихомирова, А. В. Яковлев, В. В. Алексеев // Вестник Воронежского института МВД России. – 2023. – № 2. – С. 94-100. – EDN OQNUDQ.

15. Павличева Е.Н. Модель нарушителя информационной безопасности объекта критической информационной инфраструктуры торговой площадки транспортных услуг / Е.Н. Павличева, Ф.О. Федин, А.С. Чискидов, Н.Ф. Глыбин // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2021. – Т. 18, № 5(203). – С. 28-34. – DOI 10.14489/vkit.2021.05.pp.028-034. – EDN NONTLZ.

16. Суворов, А.М. Модель сегментации потенциальных нарушителей информационной безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры / А.М. Суворов // Информационные технологии в науке, бизнесе и образовании : сборник трудов XI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 28–29 ноября 2019 года. – Москва: Московский государственный лингвистический университет, 2020. – С. 304-307. – EDN DKLRGH.

17. Беляков, М.И. Модель процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности объекта критической информационной инфраструктуры в задаче оценивания его эффективности / М. И. Беляков // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2020. – № 11-12(149-150). – С. 71-75. – EDN JDDVXC.

18. Забегалин, Е.В. Логическая модель деятельности по комплексному техническому диагностированию информационной безопасности организаций и значимых объектов критической информационной инфраструктуры / Е. В. Забегалин // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 3. – С. 145-178. – DOI 10.24411/2410-9916-2019-10308. – EDN RBNWLE.

19. Корнеева, Е.В. Модель процесса обработки событий информационной безопасности на объекте критической информационной инфраструктуры / Е. В. Корнеева, Ф. О. Федин // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2023. – Т. 20, № 7(229). – С. 53-60. – DOI 10.14489/vkit.2023.07.pp.053-060. – EDN GFYZXG.

20. Кубарев, А.В. Повышение безопасности эксплуатации значимых объектов критической инфраструктуры с использованием параметрических моделей эволюции / А.В. Кубарев, А.П. Лапсарь, Я.В. Федорова // Вопросы кибербезопасности. – 2020. – № 1(35). – С. 8-17. – DOI 10.21681/2311-3456-2020-01-08-17. – EDN XEIUFN.

References

1. Bobkov, E.O. Ensuring information security of critical information infrastructure with IOT technologies / E. O. Bobkov, E. A. Balashova, D. N. Panin // Economy and society: Development prospects : Collection of materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference, Syzran, May 14, 2020. Volume Issue 4. – Kirov: Interregional Center for Innovation Technologies in Education, 2020. – pp. 221-225. – EDN NGYUHB.

2. Bakulin, M.A. Risk management of information security violations of significant objects of critical information infrastructure / M. A. Bakulin // System engineering and information technologies. - 2023. – Vol. 5, No. 5(14). – pp. 78-87. – DOI 10.54708/2658-5014-SIIT-2023-no5-p78. – EDN CRVUZJ.

3. Analysis and risk management of information security of an object of critical information infrastructure / A.M. Gelfand, V.V. Sigacheva, A.V. Arkhipov, L. K. Sirotina // Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and Technical Sciences. - 2023. – No. 3. – PP. 21-27. – DOI 10.46418/2079-8199_2023_3_3. – EDN BKGRAY.

4. Vulfin, A.M. Models and methods of integrated assessment of security risks of critical information infrastructure facilities based on data mining : specialty 23.60.00: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Alexey Mikhailovich Vulfin, 2022. – 386 p. – EDN AUOHHT.

5. Gilmanova, E.A. Features of conducting an audit of information security of critical information infrastructure facilities in the fuel and energy complex / E. A. Gilmanova, R. I. Akhmetshina // Forum of Young Scientists. – 2022. – № 2(66). – Pp. 29-33. – DOI 10.46566/2500-4050_2022_66_29. – EDN OCSPNA.

6. Smirnov, G.E. Topical issues of the development of the theory and practice of information security audit of critical information infrastructure facilities / G. E. Smirnov, S. I. Makarenko // Problems of integrated security of the Caspian macroregion : A collection of scientific articles based on the materials of the international scientific and practical conference, Astrakhan, October 28-29, 2021 / Under the general editorship of A.P. Romanova, D.A. Chernichkin. – Astrakhan: Astrakhan State University, Publishing House "Astrakhan University", 2021. – pp. 148-157. – EDN MSQRDC.

7. Gilmanova, E.A. The role of information security audit in the life cycle of the information security system for objects of critical information infrastructure / E. A. Gilmanova, R. I. Akhmetshina // Forum of Young Scientists. – 2022. – № 2(66). – Pp. 34-37. – DOI 10.46566/2500-4050_2022_66_34. – EDN LACJED.

8. Yazov, Yu.K. Modeling of significant objects of critical information infrastructure in the interests of researching the security of information technologies used in them / Yu. K. Yazov, S. V. Solovyov // Secure information technologies : Proceedings of the Eleventh International Scientific and Technical Conference,

Moscow, April 06-07, 2021. – Moscow: Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (Moscow), 2021. – pp. 363-369. – EDN LSOBLP.

9. Kochnev, S.V. Synthesis of the structure of objects of critical information infrastructure of production processes based on Markov models / S.V. Kochnev, A.P. Lapsar, A.V. Baraboshkina // Caspian Journal: Management and high technologies. – 2022. – № 1(57). – Pp. 93-105. – DOI 10.54398/2074-1707_2022_1_93. – EDN QFRGKT.

10. Kubarev, A.V. Synthesis of a model of an object of critical information infrastructure for the safe functioning of a technical system in conditions of destructive information impact / A.V. Kubarev, A.P. Lapsar, A.A. Asiutikov // Issues of cybersecurity. – 2020. – № 6(40). – Pp. 48-56. – DOI 10.21681/2311-3456-2020-06-48-56. – EDN FNBHMN.

11. Novikova, E.F. Development of a threat model for critical information infrastructure facilities taking into account social engineering methods / E.F. Novikova, V.N. Khalizev // Caspian Journal: Management and High Technologies. – 2019. – № 4(48). – Pp. 127-135. – DOI 10.21672/2074-1707.2019.48.4.127-135. – EDN IWFVWY.

12. Ovcharov, V.A. Formal model of threats to cybersecurity of critical information infrastructure facilities / V.A. Ovcharov, A.V. Kharzhevskaya // Cosmonautics and rocket engineering. – 2021. – № 3(120). – Pp. 131-142. – EDN NJYNDR.

13. Vasilenko, V. V. Threat model of computer attacks on the digital hierarchy of objects of critical information infrastructure / V. V. Vasilenko, S.M. Klimov, O.A. Palukhin // Russian Military Security: A Look into the future : Proceedings of the 8th International Interdepartmental Scientific and Practical Conference of the Scientific Department No. 10 of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. In 3 volumes, Moscow, March 16, 2023. – Moscow: Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 2023. – pp. 194-201. – EDN YVYMEQ.

14. Tikhomirova, A. A. Formal description of information security threat modeling using the FSTEC methodology / A. A. Tikhomirova, A.V. Yakovlev, V. V. Alekseev // Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. – 2023. – № 2. – pp. 94-100. – EDN OQNUDQ.

15. Pavlicheva E.N. The model of the violator of information security of the object of critical information infrastructure of the trading platform of transport services / E.N. Pavlicheva, F.O. Fedin, A.S. Chiskidov, N.F. Glybin // Bulletin of computer and information technologies. - 2021. – Vol. 18, No. 5(203). – pp. 28-34. – DOI 10.14489/vkit.2021.05.pp.028-034. – EDN NONTLZ.

16. Suvorov, A.M. Segmentation model of potential violators of information security of significant objects of critical information infrastructure / A.M. Suvorov // Information technologies in science, business and education : proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference of Students, post-graduates and young Scientists, Moscow, November 28-29, 2019. – Moscow: Moscow State Linguistic University, 2020. – pp. 304-307. – EDN DKLRGH.

17. Belyakov, M.I. Model of the functioning of the information security system for the object of critical information infrastructure in the task of evaluating its effectiveness / M. I. Belyakov // Issues of defense technology. Series 16: Technical means of countering terrorism. – 2020. – № 11-12(149-150). – Pp. 71-75. – EDN JDDVXC.

18. Zabegalin, E.V. A logical model of activities for complex technical diagnostics of information security of organizations and significant objects of critical information infrastructure / E. V. Zabegalin // Management systems, communications and security. – 2019. – No. 3. – pp. 145-178. – DOI 10.24411/2410-9916-2019-10308. – EDN RBNWLE.

19. Korneeva, E.V. Model of the information security event processing at the critical information infrastructure facility / E. V. Korneeva, F. O. Fedin // Bulletin of Computer and Information Technologies. - 2023. – Vol. 20, No. 7(229). – pp. 53-60. – DOI 10.14489/vkit.2023.07.pp.053-060. – EDN GFYZXG.

20. Kubarev, A.V. Improving the safety of operation of significant critical infrastructure facilities using parametric models of evolution / A.V. Kubarev, A.P. Lapsar, Ya.V. Fedorova // Cybersecurity issues. – 2020. – № 1(35). – Pp. 8-17. – DOI 10.21681/2311-3456-2020-01-08-17. – EDN XEIUFN.

Сведения об авторах

ФИО	<i>Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)</i>
Пеливан Михаил Анатольевич	аспирант, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», кафедра «Информационные системы и защита информации», witcher89158779996@yandex.ru ORCID 0000-0001-8529-9627

Authors information

Last name, first name, patronymic	<i>Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)</i>
Pelivan Mikhail Anatol'yevich	Postgraduate student, Tambov State Technical University, Department of Information Systems and Information Security, witcher89158779996@yandex.ru ORCID 0000-0001-8529-9627

статья поступила в редакцию 26.04.2024	одобрена после рецензирования 14.05.2024	принята к публикации 20.05.2024
the article was submitted 26.04.2024	approved after reviewing 14.05.2024	accepted for publication 20.05.2024

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ

Ольга Николаевна Основина¹ osnovin72@mail.ru
Никита Александрович Бочаров¹ nikita.bocharow@yandex.ru

¹Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», микрорайон им. Макаренко, д. 42, г. Старый Оскол, Белгородская обл., 309516, Россия

Аннотация. Зависимость уровня шумов от рабочих условий, характеристик и параметров как отдельных дискретных компонентов, так и всего усилительного тракта обуславливает объективную необходимость проведения комплексного шумового анализа, что позволит повысить оперативность и достоверность принятия решений при проектировании прецизионных усилительных каскадов. В статье рассматриваются способы минимизации и оценки уровня шумов биполярных и полевых транзисторов, а также усилительных каскадов на них реализованных, полученные при помощи средства анализа шумов (Noise Analysis) программы Multisim. С помощью используемого программного продукта появляется возможность оперативной корректировки требуемых параметров и характеристик благодаря встроенному набору средств анализа, что является надежным помощником в схемотехническом моделировании и может быть успешно применено в рамках учебной и проектной деятельности.

Ключевые слова: коэффициент шума, биполярный и полевой транзистор, каскадная схема, источник шумового напряжения, малошумящий усилитель, входной ток шума.

Для цитирования: Основина О. Н., Бочаров Н. А. Моделирование и измерение шумовых параметров усилительных каскадов // Инженерные технологии. 2024. № 2 (6). С. 27-35.

Original article

MODELING AND MEASUREMENT OF NOISE PARAMETERS OF BIPOLAR TRANSISTORS

Olga N. Osnovina¹ osnovin72@mail.ru
Nikita A. Bocharov¹ nikita.bocharow@yandex.ru

¹Starooskolsky Technological Institute. A.A. Ugarova (branch) FSAEI HE National Research Technological University "MISIS", the microdistrict named after Makarenko, 42, Stary Oskol, Belgorod region, 309516, Russia

Abstract. The dependence of the noise coefficient on the operating conditions, characteristics and parameters of discrete components determines the objective need for comprehensive noise analysis and noise level assessment, which will increase the efficiency and reliability of decision-making in the design of precision amplifier stages and low-noise amplifiers. The article discusses ways to minimize and estimate the noise level of bipolar transistors obtained using the noise Analysis tool of the Multisim program. This software product with the ability to quickly change parameters and a full set of analysis tools is a reliable assistant in circuit modeling and can be successfully applied within the framework of educational and project activities. The article also considers an example of estimating the level of a bipolar transistor's own.

Keywords: noise factor, bipolar and field effect transistor, cascode circuit, noise voltage source, low noise amplifier, noise input current.

For citation: Osnovina O. N., Bocharov N. A. Modeling and measurement of noise parameters of bipolar transistors. *Ingenerye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (2 (6)): 27-35. (In Russ.).

Введение

Одним из способов снижения уровня помех и искажений при приеме и обработке слабых сигналов современными электронными устройствами является обеспечение низкого уровня собственных шумов принимающего и передающего тракта [1]. Существующие методы повышения соотношения полезного сигнала к шумовой составляющей сводятся, с одной стороны, к увеличению мощно-

сти передаваемого сигнала, а с другой – в увеличении усиления приемной антенны. Это обусловлено тем, что увеличение мощности передаваемого сигнала ограничивается действующими нормативами и регламентами, а увеличение усиления в антенне связано с необходимостью разработки более дорогой и, как следствие, более громоздкой антенной системы [2]. Иным способом увеличения отношения полезного сигнала к шуму является минимизация шумовых составляющих приемной

системы и ее компонентов. Таким образом, необходимо обеспечить возможность контроля коэффициента шума, чтобы гарантировать, что шум, вносимый элементами приемной и передающей систем, находится в требуемом и допустимом диапазоне.

В электронных устройствах, работающих с приемом и передачей электромагнитных сигналов, зачастую принятый сигнал имеет малую мощность. При его передаче на большие расстояния воздействуют шумы – высокочастотные, электромагнитные импульсы малой амплитуды, которые обуславливают значительные искажения сигнала. Для усиления маломощных сигналов, как правило, применяется многокаскадный усилитель. При этом каждый каскад усиления, как и любой радиоэлектронный компонент, имеет свой уровень шумов, который характеризуется коэффициентом шума. Основной вклад в шумы усилительного каскада вносят его тепловые и фликкер-шумы. Общий шум многокаскадного усилителя можно рассчитать по формуле:

$$F = F_n + K_{U_n} \cdot (F_{n-1} + K_{U_{n-1}} \cdot (F_{n-2} + K_{U_{n-2}} \cdot (...))), \quad (1)$$

где F – общий коэффициент шума усилителя, F_n – коэффициент шума n -го каскада, K_{U_n} – коэффициент усиления отдельного каскада. Из-за наличия шумов усилителя и шумов во входном маломощном сигнале на выходе может быть значительно искаженный сигнал.

$$E_{\text{швх}}^2 = 4kTR_{\text{ист}}\Delta f + 4kT \left(r_6 + \frac{r_b}{2} \right) \Delta f + \frac{2qI_b}{h_{21\beta}} \Delta f (R_{\text{ист}} + r_6)^2, \quad (2)$$

где первая часть – тепловые шумы источника сигнала $R_{\text{ист}}$, вторая – источник шумового напряжения, третья – напряжение шума, создаваемого токовой составляющей на сопротивлении источника сигнала и объемном сопротивлении базы БТ r_6 [3]. Как видно из формулы (2), важнейшими шумовыми параметрами БТ являются объемное сопротивление базы r_6 и коэффициент усиления по току $h_{21\beta}$. Чем меньше $h_{21\beta}$, тем больше шумы, так как уменьшение $h_{21\beta}$ сопровождается увеличением тока базы I_b , что приводит к увеличению шумового напряжения на сопротивлении базы r_6 . Поскольку r_6 включено во входную цепь БТ с общим эмиттером, то шумовое напряжение усиливается вместе с полезным сигналом. Помимо сказанного, уменьшение $h_{21\beta}$ приводит к усилению рекомбинации пар носителей в БТ, которая является причиной дополнительных рекомбинационных шумов.

Из формулы (1) видно, что наибольший вклад в общий коэффициент шума многокаскадного усилителя вносит первый каскад, а вклад шумов каждого следующего каскада уменьшается пропорционально усилению предшествующих. Поэтому необходимо при проектировании выбирать входные каскады с минимальным уровнем шума и использовать специальные проектные решения для снижения коэффициента шума.

В настоящее время существует достаточно большое количество схемотехнических вариантов снижения уровня шума усилителя и у каждого есть свои преимущества и недостатки. Также сами электронные активные компоненты, на которых реализована усилительная схема, являются источниками множества шумов, учесть влияние которых достаточно сложно из-за необходимости анализа большого разнообразия и разнородности влияющих факторов и условий. Поэтому проектирование конкретного усилителя с заданным уровнем шумовой составляющей является достаточно сложной оптимизационной задачей.

Материал и методы исследования

Основными источниками шумов в биполярном транзисторе (БТ) считаются тепловые шумы, дробовые шумы и фликкер-шумы.

Среднеквадратичное напряжение входных шумов складывается из трех частей:

При увеличении коллекторного тока $I_{к0}$ в режиме покоя шумы возрастают. Для их снижения можно понизить напряжение $U_{кб}$ на коллекторном р-п переходе, но это приведет к снижению коллекторного $I_{к0}$ и эмиттерного $I_{э0}$ токов, а, следовательно, и $h_{21\beta}$, что опять-таки повысит уровень шумов.

По частоте шумы БТ распределены неравномерно. На низких частотах увеличиваются мерцательные шумы, а в верхних частотах коэффициент шума возрастает вследствие снижения $h_{21\beta}$. Чем шире полоса пропускания усилителя, тем выше уровень шумов [2].

Поэтому при проектировании малошумящих усилителей на БТ необходимо найти компромиссное решение, которое учитывает усиление каскада и его коэффициент шума, при соблюдении условия устойчивости в рабочем диапазоне частот и за его пределами. Для этого требуется знать, как коэффициент

усиления БТ и его коэффициент шума изменяются в зависимости от внутреннего сопротивления источника сигнала, токов коллектора и эмиттера, сопротивления базы, температуры и других факторов [1].

Шум, созданный БТ, можно проанализировать с помощью модели (рисунок 1), имею-

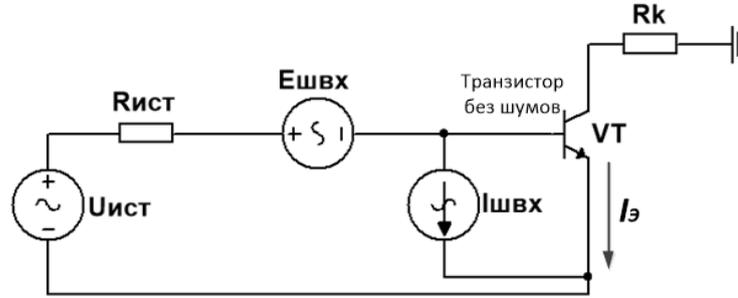


Рисунок 1. Эквивалентные генераторы шумов, приведенных ко входу биполярного транзистора
Figure 1. Equivalent noise generators driven to the input of a bipolar transistor

В данном представлении модели предполагается, что сам транзистор бесшумный и просто усиливает полное эффективное напряжение входного шума:

$$e_{вх.эфф.} = [e_{швх}^2 + (R_{ист}i_{швх})^2]^{1/2}, \quad (3)$$

где второе слагаемое – это напряжение шума, вызванное прохождением шума входного тока БТ через $R_{ист}$. В (3) складываются квадраты этих двух шумов потому, что они не коррелированы (исключение – очень высокие частоты) [1].

Напряжение эквивалентного генератора входного шумового напряжения $e_{швх}$ зависит от теплового шума, генерируемого объемным сопротивлением базовой области транзистора $r_б$, и дробового шума тока коллектора I_k , порождающего шумовое напряжение на эмиттерном дифференциальном сопротивлении $r_э$:

$$\begin{aligned} e_{швх}^2 &= 4kTr_б + 2qI_k r_э^2 = \\ &= 4kTr_б + 2 \frac{(kT)^2}{(qI_k)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Необходимость учета шумового входного тока $i_{швх}$, определяемого с помощью (5), обусловлена тем, что он вызывает дополнительный шум напряжения на сопротивлении источника сигнала $R_{ист}$:

$$i_{швх}^2 = \frac{2qI_э}{h_{21э}}. \quad (5)$$

Основной причиной появления этого тока являются колебания дробового шума в установившемся базовом токе $I_б$, складывающиеся с флуктуациями, порожденными шумом фликкер-эффекта в $r_б$ [5].

Тот факт, что $e_{швх}$ падает, а $i_{швх}$ растет с ростом эмиттерного тока $I_э$, позволяет оптими-

зировать достаточную точность для многих задач. На рисунке 1 $e_{швх}$ является источником входного шумового напряжения, последовательным по отношению к входному сигналу, а $i_{швх}$ обозначает шум входного тока [1].

зировать рабочий ток транзистора с целью получения минимального уровня шума при заданных параметрах источника сигнала [1].

Коэффициент шума на выходе биполярного транзистора определяется выражением:

$$F = \left(1 + \frac{r_б}{R_{ист}} + \frac{r_э}{2R_{ист}}\right) \left(1 + \frac{1}{h_{21э}}\right) + \frac{(R_{ист} + r_б)^2}{2h_{21э}R_{ист}}. \quad (6)$$

Поскольку он зависит не только от $R_{ист}$, но и от $I_э$, актуализируется задача определения оптимального значения эмиттерного тока $I_{эопт}$, при котором коэффициент шума снижается [2].

Минимум шумов БТ достигается при токе эмиттера:

$$I_{эопт} = \frac{\varphi_T \sqrt{h_{21э}}}{R_{ист} + r_б}. \quad (7)$$

При этом оптимальное сопротивление эмиттера:

$$r_{эопт} = (R_{ист} + r_б) \sqrt{\frac{1}{1 + h_{21э}}}. \quad (8)$$

Для вычисленных $r_{эопт}$ и $I_{эопт}$ коэффициент шума:

$$F_{min}^I = \frac{r_б + \frac{r_{эопт}}{2} + R_{ист}}{R_{ист}}. \quad (9)$$

Оптимальное сопротивление источника сигнала:

$$R_{ист.опт} = \sqrt{(r_б + r_э)^2 + h_{21э}r_э(r_э + 2r_б)}. \quad (10)$$

Тогда коэффициент шума:

$$F_{min}^R = 1 + \frac{r_б + r_э + R_{ист.опт}}{h_{21э}r_б}. \quad (11)$$

Абсолютный минимум коэффициент шума достигается при одновременном ис-

пользовании оптимального режима работы БТ и сопротивлении источника сигнала:

$$R'_{ист.опт} = r_6 \sqrt{h_{213}}; \quad (12)$$

$$F'_{min} = 1 + \frac{r_{эопт} + r_6(1 + \sqrt{h_{213}})}{h_{213} r_{эопт}}. \quad (13)$$

При выборе элементной базы и проектировании многокаскадного усилителя для работы со слабым входным сигналом необходимо уделить особое внимание малому шумному построению первого каскада, поскольку именно он является основным источником шумов. В случае, когда входной полезный сигнал слабее собственных шумов усилителя, то его прием и обработка становятся практически невозможны [8]. Выбор элементной базы для реализации входного каскада обусловлен необходимостью согласования сопротивлений источника сигнала и входного каскада, а также поиском оптимальных режимов работы каскада по постоянному току за счет выбора схем смещения и питания.

Одним из распространенных вариантов является выбор полевого транзистора (ПТ), в собственные шумы которого основной вклад вносят тепловые флуктуации носителей в канале. Расчет теплового (джонсоновского) шума, устанавливающего нижнюю границу напряжения шумов всего усилителя, осложняется тем, что сечение канала зависит от режима работы ПТ. Однако, среднеквадратичное значение шумового тока канала можно рассчитать [2]:

$$\overline{I_{шк}^2} = 4kT * \frac{2S}{3}, \quad (14)$$

где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура в кельвинах, S – значение крутизны характеристики полевого транзистора [1].

Причиной появления фликкер-шума в ПТ является кольцевой $p-n$ -переход, смещенный в обратном направлении. В цепи затвора протекает обратный ток затвора I_3 – ток утечки, который содержит дробовой шум. Среднеквадратичное значение шумового тока затвора можно рассчитать [7]:

$$\overline{I_{шз}^2} = 2qI_3 \Delta f, \quad (15)$$

где Δf – ширина полосы пропускания [2].

Точное значения частоты, с которой возникает фликкер-шум, на практике определить достаточно проблематично, так как в разных литературных источниках указаны значения 10^{-3} , 10^{-2} , $6 \cdot 10^{-5}$ Гц.

При возрастании частоты начинает проявляться индуцированный шум затвора. Тепловой шум канала вызывает локальные флук-

туации заряда, следовательно, и потенциала относительно затвора. Это приводит к появлению шумового емкостного тока в цепи затвора. Среднеквадратичное значение этого тока оценивается формулой:

$$\overline{I_{шз инд}^2} = 4kT \Delta f * \frac{w^2 C_{зи}}{4S}, \quad (16)$$

где $C_{зи}$ – емкость затвор-исток, w – проводимость участка затвор-исток [1].

Таким образом, для ПТ шумовой ток складывается из трех частей:

$$I_{ш}^2 = \overline{I_{шз}^2} + \overline{I_{шз инд}^2} + \overline{I_{шк}^2}. \quad (17)$$

Необходимость поиска компромисса между усилением каскада, сохранением устойчивости в рабочем диапазоне частот, шумовыми показателями, низким энергопотреблением, потерями, искажениями и др. обуславливает объективную необходимость детального анализа и учета множества, зачастую противоречащих друг другу, факторов при проектировании малошумящих усилителей на дискретных элементах [2].

Использование существующих техник расчета шума придает проектированию малошумных усилителей весьма громоздкий и трудоемкий вид [3], так как весь процесс неразрывно связан с необходимостью детального анализа паспортных данных транзисторов, построения их шумовых характеристик, количественной оценки отдельного вклада различных шумовых источников и т. д. Поэтому при проектировании малошумящих схем важно использовать современные автоматизированные средства анализа и компьютерного проектирования, что позволит проверить правильность расчета параметров элементов и характеристик усилителя.

Результаты исследования

Выбранная для моделирования шумовых свойств транзисторов система виртуального моделирования Multisim, имеющая понятный пользовательский интерфейс и значительный набор функциональных возможностей, получила широкое распространение в высших учебных заведениях, где используется в качестве лабораторного практикума по целому ряду дисциплин. Multisim позволяет реализовывать и оперативно исследовать аналоговые и цифровые радиофизические устройства, измерительные системы [4].

Для моделирования шумовых свойств БТ был выбран транзистор КТ3102 (его аналог в Multisim – 2N5209) с объемным сопротивлением базы 600 Ом, частотой среза фликкер-

шума 10 кГц, током эмиттера 10 мА и коэффициентом усиления по току 300. Полученные с помощью (4) и (5) значения параметров эквивалентных генераторов входного шумового напряжения и тока соответственно:

$$e_{\text{швх}}^2 = 9,74 \cdot 10^{-18} \text{ В/Гц},$$

$$i_{\text{швх}}^2 = 2,13 \cdot 10^{-23} \text{ А/Гц}.$$

Рассчитанное с помощью (10) оптимальное сопротивление источника сигнала $R_{\text{ист.опт}} = 231 \text{ Ом}$. Среднеквадратичное напря-

жение входных шумов, рассчитанное с помощью (2) для полосы пропускания $\Delta f = 10 \text{ кГц}$ составило $E_{\text{швх}}^2 = 6,87 \cdot 10^{-14} \text{ В/Гц}$.

На рисунке 2 представлены результаты моделирования, полученные с помощью средства анализа шумов Noise Analysis. Рассчитанные и измеренные значения суммарных внешних шумов практически совпали.

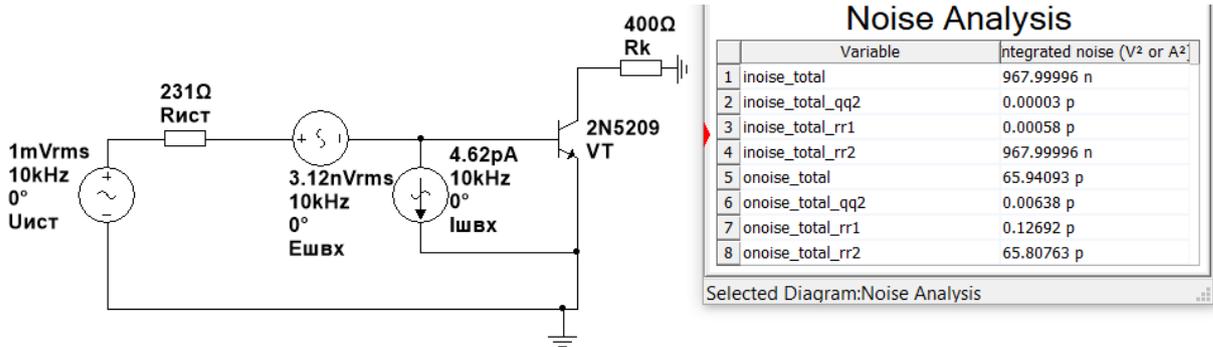


Рисунок 2. Результаты шумового анализа биполярного транзистора 2N5209

Figure 2. The results of the noise analysis of the bipolar transistor 2N5209

Анализ шумов моделируемого БТ представлен спектром выходного суммарного внутреннего/внешнего шума (inoise_total/onoise_total), спектром вклада внешних и внутренних шумов, создаваемых резисторами схемы и самим транзистором [4].

Для анализа шумовых свойств ПТ был реализован усилитель на малощумящем полевом транзисторе 2SK117. Для моделирования работы усилителя в режиме покоя задали ток стока в соответствии со справочными данными $I_c = 0.5 \text{ мА}$ [7], для которого нормирован коэффициент шума.

Для определения параметров режима покоя на полученной стоко-затворной характеристике выбранного ПТ задали положение точки покоя для условия усиления входных сигналов с минимальными линейными искажениями [6] (рисунок 3). Определили сопротивление в цепи истока $R_{\text{и}} = \frac{U_{\text{зи}}}{I_c}$ и стока $R_c = \frac{E_k - U_c}{I_c}$.

При этом напряжение стока определено как $U_c = \frac{E_k - U_{\text{зи}}}{2}$. Результаты измерения тока покоя I_c (рисунок 3) подтверждают правильность выполненных расчетов.

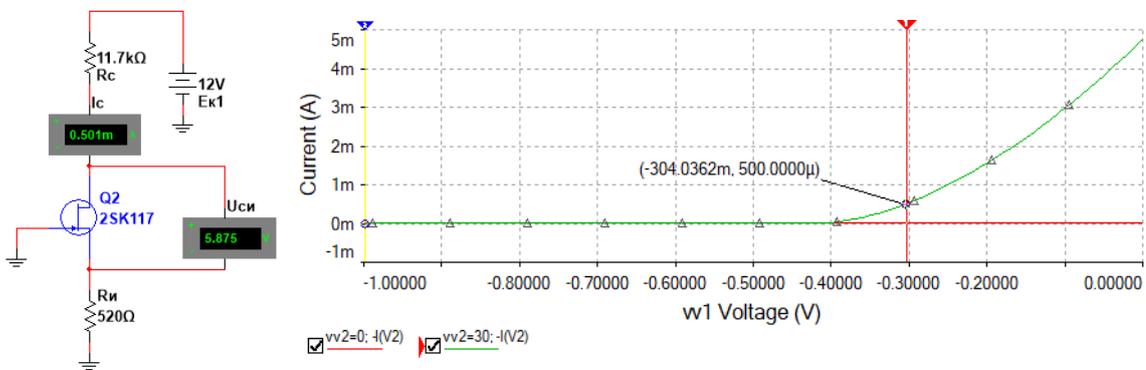


Рисунок 3. Результаты моделирования режима покоя усилителя и выбор точки покоя

Figure 3. Simulation results of the amplifier's rest mode and selection of the rest point

Для устранения влияния шунтирующего конденсатора C_u в диапазоне низких частот на шумовые свойства каскада (рисунок 4) его емкость необходимо выбирать с запасом [2]:

$$C_u \geq \frac{1600}{f_{min}R_{in}}, \quad (18)$$

где f_{min} – минимальная частота усиления.

Принципиальная схема усилителя с рассчитанными выше параметрами и результаты моделирования спектра внешних и внутренних шумов представлены на рисунке 4.

По результатам выполненного шумового анализа видно, что шумы присутствуют на всех частотах [5]. На рисунке 4, б в таблице представлены коэффициенты внутренних и внешних шумов, вносимые каждым компонентом промоделированного усилителя. Полученный график спектра внешнего шума (рисунок 4, в) показывает, проявление фликкер-шума до частоты 517 Гц , а после того, как частота превысила 30 МГц , начал затухать коэффициент усиления, вследствие чего шумы снизились до минимального значения.

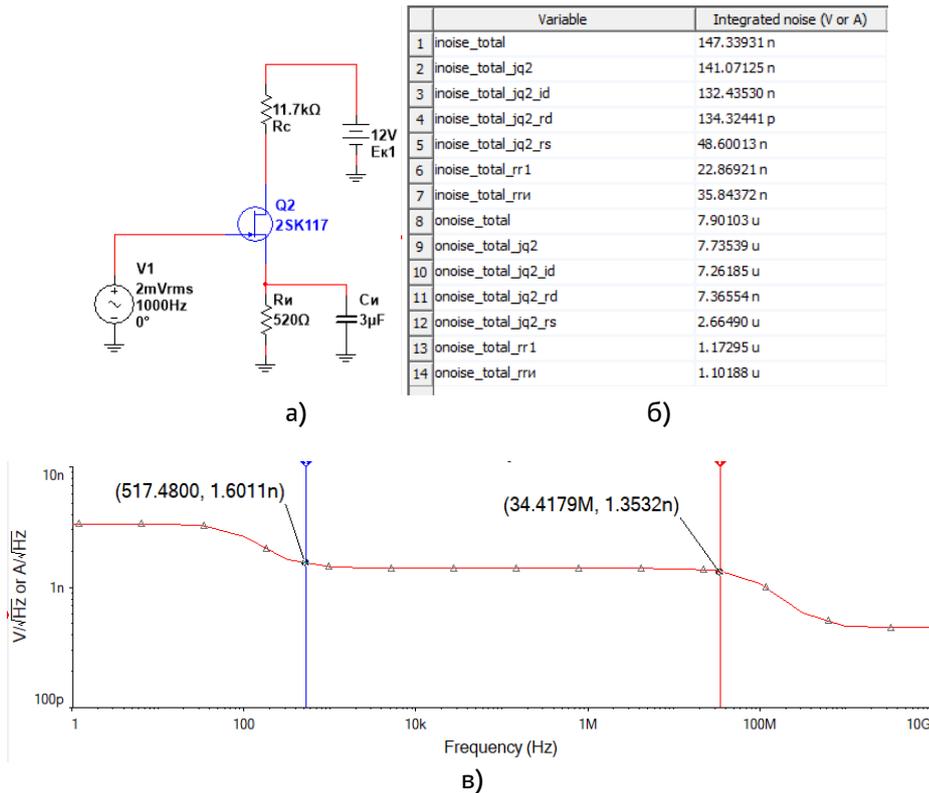


Рисунок 4. Результаты моделирования: а – схема моделируемого усилителя; б – оценка шумовых вкладов; в – график спектра внешних шумов

Figure 4. Simulation results: a – circuit of the simulated amplifier; б – estimation of noise contributions; c – graph of the spectrum of external noise

На рисунке 5 представлены результаты моделирования каскадной схемы ОЭ-ОЗ на биполярном транзисторе КП307Г и полевом транзисторе КТ368АМ (их аналоги в Multisim – 2N4220, 2N3414). Такое схемотехническое решение позволяет получить высокий коэффициент усиления, значительно снизить входную емкость из-за ослабления влияния проходной емкости, за счет устранения эффекта Миллера, уменьшить линейные искажения в

области верхних частот (ВЧ). На входе каскада включен обычный усилительный каскад на БТ, а на выходе – повторитель тока на ПТ. Каскадное соединение элементов при работе на индуктивную нагрузку почти полностью устраняет вероятность самовозбуждения.

По результатам выполненного шумового анализа (рисунок 5) видно, что шумы снижаются на частотах выше 8 МГц .

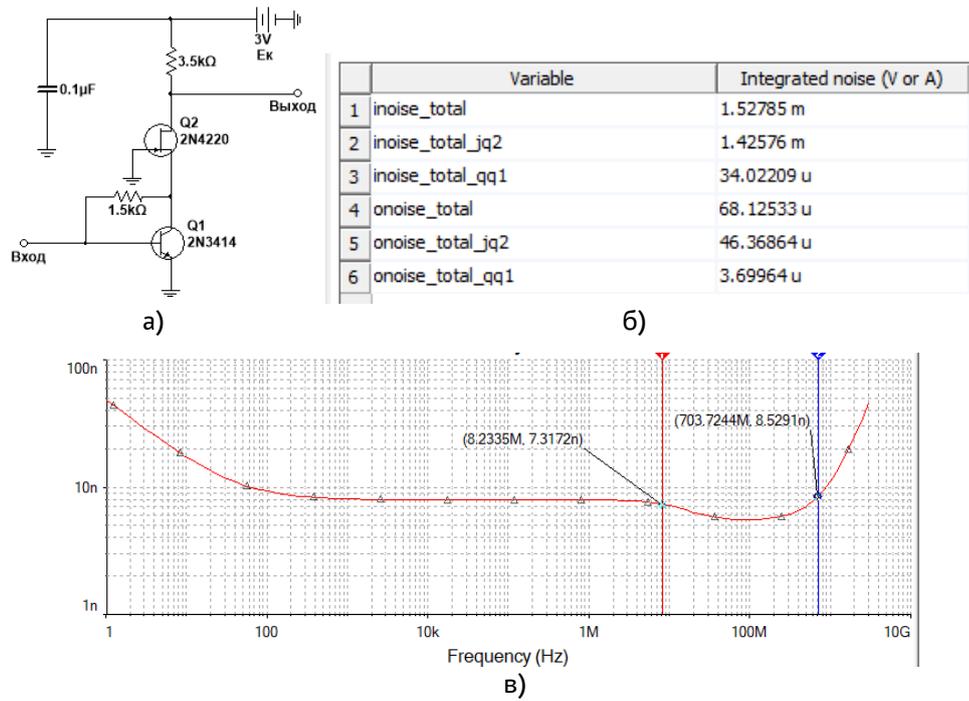


Рисунок 5. Результаты шумового анализа каскодной схемы: а – исследуемая схема; б – значения шумовых токов и напряжений элементов; в – график спектра внутренних шумов усилителя

Figure 5 The results of the noise analysis of the cascode circuit: a – the circuit under study; b – the values of noise currents and voltages of the elements; c – a graph of the spectrum of internal noise of the amplifier

На рисунке 6 представлены результаты моделирования двухкаскадного усилителя на БТ, на вход которого подается маломощный сигнал частотой 10 кГц. Суммарный уровень шумов (inoise_total) на выходе первого каскада

(рисунок 6, б) заметно ниже, чем на выходе всего усилителя (рисунок 6, в). Также в результатах шумового анализа получены уровни шумов, вносимых резисторами усилительного тракта.

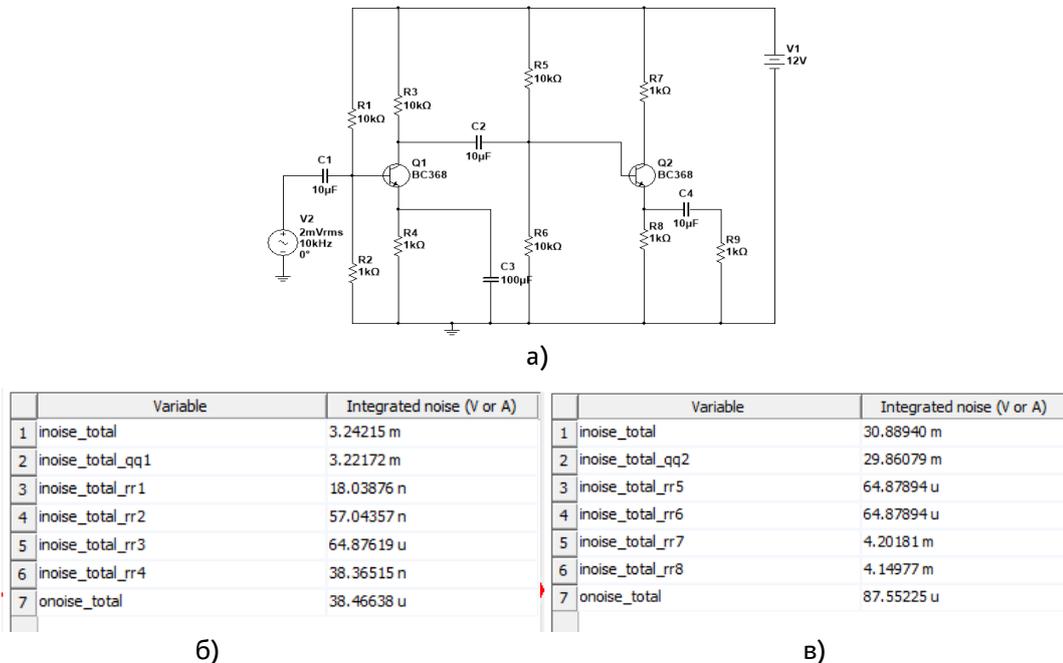


Рисунок 6. Результаты шумового анализа двухкаскадного усилителя: а – исследуемая схема; б – значения шумовых токов и напряжений элементов первого каскада; в – значения шумовых токов и напряжений на выходе всего усилителя

Figure 6. The results of the noise analysis of a two-stage amplifier: a – the circuit under study; b – the values of noise currents and voltages of the elements of the first stage; c - the values of noise currents and voltages at the output of the entire amplifier

По полученной АЧХ усилителя определена полоса его рабочих частот (рисунок 7, а) и уровень шумовых составляющих на краях полосы пропускания (рисунок 7, б).

Оптимальная полоса рабочих частот для практического использования данного усилителя от 205 Гц до 174 кГц, так как на частотах до 205 Гц, присутствуют фликкер-шумы, а на частотах выше 174 кГц начинается спад коэффициента усиления БТ каскада.

Выводы

Обеспечение возможности измерения и контроля уровня шумов как отдельных

элементов, так и всего усилителя позволит без труда оценивать чувствительность всей системы, обеспечить высокое качество передачи и приема слабых сигналов, оптимизировать работу усилительных устройств. Принцип электронной лаборатории с наличием виртуальных измерительных приборов, заложенный в систему моделирования Multisim, значительно упрощает проведение одного из самых сложных этапов – расчета и моделирования процессов, протекающих в электронном устройстве [4].

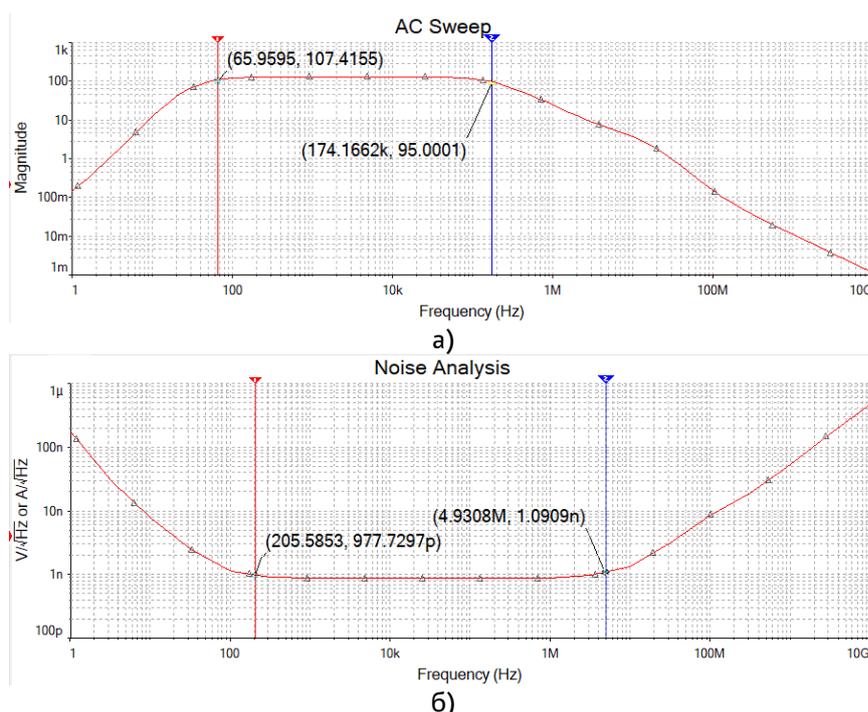


Рисунок 7. Результаты моделирования АЧХ и уровня шумов в полосе пропускания: а – амплитудно-частотная характеристика усилителя; б – график спектра шума

Figure 7. The results of modeling the frequency response and noise level in the bandwidth: а – amplitude-frequency response of the amplifier; б – graph of the noise spectrum

Таким образом, детальный анализ и возможность измерения и оценки шумового вклада отдельных компонентов усилителя является неотъемлемой частью в проектировании современных прецизионных измерительных

устройств, так как позволяет, моделируя их работу, оптимизировать устройства и обеспечить необходимое качество усиления и приема сигналов.

Литература

1. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2-х томах. Пер. с англ. – М.: Мир, 1983-598 с.
2. Ежков Ю. А. Справочник по схемотехнике усилителей. – 2-е изд., перераб. – М.: ИП РадиоСофт, 2002–272 с.
3. NI Circuit Design Suite - Getting Started with NI Circuit Design Suite. National Instruments, Jan. 2012-36с.
4. Гололобов В.Н. Схемотехника с программой Multisim для любознательных. – СПб.: Наука и Техника, 2019. – 272 с.

5. Колесникова Т. Инструменты анализа схем электрических принципиальных в программной среде NI Multisim 12.0 Часть 1 // Компоненты и технологии. 2015. №3 С. 113-120.
6. Силантьев А.А., Шатров В.А., Вильданов А.И., Рябушкин С.А., Патюков В.Г. Оценка отношения сигнал/шум в космических системах связи // Международный научно-технический журнал «Наукоёмкие технологии», 2016, № 7. С. 10
7. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. Издательский дом «Додэка-XXI», М., 2005-528 с.
8. Войшвилло Г. В. Усилительные устройства. Издательство «Радио и связь», 1983, 264 с.
9. Новиков Ю. В. Основы цифровой схемотехники. «Мир», 2001, 379 с.

References

1. Horowitz P., Hill U. The art of circuit engineering: In 2 volumes. Translated from English – М.: Mir, 1983-598 p.
2. Yezhkov Yu. A. Handbook of amplifier circuitry. – 2nd ed., reprint – М.: IP Ra-dioSoft, 2002-272 p.
3. NI Circuit Design Suite - Getting Started with NI Circuit Design Suite. National Instruments, Jan. 2012-36с.
4. Gololobov V.N. Circuit design with the Multisim program for the curious. – St. Petersburg: Nauka i Tekhnika, 2019. – 272 p.
5. Kolesnikova T. Tools for analyzing electrical circuit diagrams in the NI Multisim 12.0 software environment Part 1 // Components and Technologies. 2015. No.3 pp. 113-120.
6. Silantsev A.A., Shatrov V.A., Vildanov A.I., Ryabushkin S.A., Patyukov V.G. Evaluation of the signal-to-noise ratio in space communication systems // International Scientific and Technical Journal "High-tech technologies", 2016, No. 7. p. 10
7. Volovich G.I. Circuit design of analog and analog-digital electronic devices. Publishing house "Dodeka-XXI", Moscow, 2005-528 p.
8. Voishvillo G. V. Amplifying devices. Radio and Communications Publishing House, 1983, 264 p.
9. Novikov Yu. V. Fundamentals of digital circuitry. Mir, 2001, 379 p.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Основина Ольга Николаевна	кандидат технических наук, доцент, Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ,ФГАОУ ВО Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», osnovin72@mail.ru
Бочаров Никита Александрович	Студент – бакалавр, Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ,ФГАОУ ВО Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», nikita.bocharow@yandex.ru

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Osnovina Olga Nikolaevna	Candidate of Technical Science, associate professor, Starooskolsky Technological Institute. A.A. Ugarova (branch) FSAEI HE National Research Technological University "MISIS", osnovin72@mail.ru
Bocharov Nikita lekandrowitsch	bachelor student, Starooskolsky Technological Institute. A.A. Ugarova (branch) FSAEI HE National Research Technological University "MISIS", nikita.bocharow@yandex.ru

статья поступила в редакцию 30.04.2024	одобрена после рецензирования 17.05.2024	принята к публикации 30.05.2024
the article was submitted 30.04.2024	approved after reviewing 17.05.2024	accepted for publication 30.05.2024

КОМПЕНСАЦИЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВАМИ ИМИТАЦИИ ФИЗИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Сергей Викторович Карпушкин ✉	1	karp@mail.tstu.ru
Обухов Артем Дмитриевич	1	obuhov.art@gmail.com
Сиухин Александр Андреевич	1	mr.siuhin@yandex.ru

¹Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106/5, Тамбов, 392000, Россия

Аннотация. Статья посвящена решению проблемы запаздывания реакций беговой платформы устройства имитации физических нагрузок (бегового тренажера) на движения пользователя. Негативное влияние запаздывания на вестибулярный аппарат пользователя усиливается при использовании шлема виртуальной реальности в процессе тренировки. Предлагается методика модификации системы управления действующего тренажера, включающая постановку задачи управления беговым полотном тренажера, алгоритмы обработки входных кадров камер-наблюдателей, систематизации движений пользователя на беговой платформе тренажера с наблюдателями, прогнозирования движения пользователя на беговой платформе тренажера. Тестирование программных модулей, реализующих разработанные алгоритмы, с использованием видеопотока тренировок конкретного пользователя показало, что за 0.167 с (при скорости передачи кадров камерами-наблюдателями 30 кадров/с) удалось выбрать массив повторяющихся движений пользователя, ранее сформированный на основе 21 закономерности, и спрогнозировать его движения на период до 0.8 с, обеспечив таким образом полную или частичную компенсацию запаздывания.

Ключевые слова: беговой тренажер, модификация системы управления, запаздывание реакций бегового полотна, методика компенсации запаздывания, закономерности и прогнозирование движений пользователя.

Для цитирования: Карпушкин С. В., Обухов А. Д., Сиухин А. А. Компенсация запаздывания систем управления устройствами имитации физических нагрузок // Инженерные технологии. 2024. № 2 (6). С. 36-44.

Original article

COMPENSATION OF DELAY IN CONTROL SYSTEMS FOR PHYSICAL ACTIVITY SIMULATION DEVICES

Sergey V. Karpushkin ✉	1	karp@mail.tstu.ru
Artem D. Obukhov	1	obuhov.art@gmail.com
Aleksandr A. Siukhin	1	mr.siuhin@yandex.ru

¹Tambov State Technical University, Sovetskaya str., 106/5, Tambov, 392000, Russia

Abstract: The article is devoted to solving the problem of delayed reactions of the running platform of the exercise simulation device (running simulator) to the user's movements. The negative effect of lag on the user's vestibular apparatus is enhanced when using a virtual reality helmet during training. A method for modifying the control system of an operating simulator is proposed, including setting the task of controlling the treadmill of the simulator, algorithms for processing input frames of surveillance cameras, systematizing user movements on the running platform of the simulator with observers, predicting user movement on the running platform of the simulator. Testing of software modules implementing the developed algorithms using a video stream of a specific user's training showed that in 0.167 seconds (at a frame rate of 30 frames/s by observer cameras) it was possible to select an array of repetitive user movements previously formed on the basis of 21 patterns, and predict his movements for a period up to 0.8 seconds, thus ensuring full or partial compensation for the delay.

Keywords: running simulator, modification of the control system, delay of the reactions of the canvas, the technique of compensation of delay, patterns and forecasting of user movements.

For citation: Karpushkin S. V., Obukhov A. D., Siukhin A. A. Compensation of delay in control systems for physical activity simulation devices. *Ingeneryne tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (2 (6)): 36-44. (In Russ.).

Введение

Наиболее распространенными устройствами имитации физических нагрузок (УИФН) являются беговые тренажеры, используемые для реабилитации в медицине, тестирования персонала в горнодобывающей промышленности, физической подготовки в формированиях специального назначения (МЧС, полиция, армия). Подобные тренажеры позволяют имитировать рельеф местности и контролировать положение тренируемых в реальном времени, а также тестировать их физическое состояние. Основными компонентами УИФН являются беговая платформа (БПТ) – электро-механическое устройство для создания нагрузки на пользователя, и система управления (СУТ) – компьютер и комплекс программ управления тренажером.

Отличительной особенностью рассматриваемых УИФН является замкнутый цикл управляющих реакций. Тренируемый-пользователь создает внешнее воздействие, на основе которого СУТ формирует управляющее воздействие на БПТ, а та, в свою очередь, влияет на пользователя. Процесс управления УИФН – это адаптация реакции беговой платформы тренажера к внешней среде (действиям пользователя).

Процесс формирования управляющего воздействия на БПТ основан на получении и анализе данных о движении пользователя, который осуществляется в реальном времени в процессе тренировки. Основной проблемой является запаздывание реакций беговой платформы на движения пользователя: от момента начала изменения текущего положения пользователя до момента начала реализации СУТ ответной реакции БПТ проходит некоторое время. Причиной возникновения запаздывания является одновременное выполнение СУТ нескольких функций: определение положения и скорости движения пользователя, учет инертности компонентов беговой платформы, а также ограничений, определяемых требованиями техники безопасности и состоянием пользователя. Продолжительности реализации этих функций и создают запаздывание реакции БПТ, которое препятствует управлению в реальном времени. Запаздывание негативно влияет на вестибулярный аппарат пользователя, препятствуя его естественному перемещению. Негативный эффект существенно усиливается, если пользователь тренируется в шлеме виртуальной реальности, т.е. не контролирует свое реальное положение на полотне тренажера. Результаты анализа публикаций, посвященных проблеме запаздывания реакции БПТ на действия пользователя [1-5], приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты исследований запаздывания реакций БПТ

Table 1. Results of studies of delayed reactions of the running platform

Исследователь / Researcher	Запаздывание реакции БПТ, с / Delayed reaction of the running platform, s	Скорость пользователя до остановки, м/с / User's speed to stop, m/s	Смещение пользователя при остановке до, м / User offset when stopping to, m
Hedjazi N.	0.43-0.57	1.2	0.52-0.64
Lee H.	0.85	3.0	2.50
Lichtenstein L.	1.48	1.3	1.92
DeLuca A.	2.00	0.5	1.00
Pyo S.	2.00	2.5	5.00

Предлагаемые этими авторами усовершенствования СУТ, направленные на минимизацию запаздывания реакций БПТ, не обеспечивают его полной компенсации. Даже минимального достигнутого значения 0.43 с недостаточно для обеспечения естественного передвижения пользователя в моменты изменения скорости его движения. Постоянные корректировки скорости бегового полотна негативно влияют на вестибулярный аппарат тренируемого, что заставляет останавливать процесс реабилитации или тренировки. Сбор данных о действиях пользователя может потребовать использования дополнительного оборудования, ограничивающего свободу движений. Поэтому

актуальной проблемой в научном и практическом плане является разработка, программная реализация и интеграция в СУТ алгоритмов, позволяющих прогнозировать действия тренируемого и обеспечивать компенсацию запаздывания реакции БПТ: необходимо предварительно сформировать библиотеку массивов повторяющихся движений пользователя (БМПДП) и в реальном времени выбирать из нее массивы, передача которых в СУТ позволит компенсировать запаздывание.

Для сбора информации о движении пользователя используются различные устройства, называемые наблюдателями (механические и ультразвуковые датчики, устройства

трехмерного позиционирования, видеокаме-
ры). В результате анализа их особенностей [6-
8] сформулированы следующие требования:
- отсутствие на пользователе навесного обору-
дования, ограничивающего свободу его
движений;

- невосприимчивость наблюдателей к фоновому электромагнитному излучению тренажера;
- область действия наблюдателей ≥ 1.5 м (типовая длина БПТ).

Характеристики наиболее распространенных наблюдателей представлены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики наблюдателей

Table 2. Characteristics of observers

№	Тип наблюдателя / Type of observer	Ограничения использования / Usage Restrictions	Навесное оборудование / Attachments	Область действия, м / Scope of action, m
1	Механический датчик	-	Ремень	≤ 2
2	Ультразвуковой датчик	-	-	0.3 – 1
3	Устройство трехмерного позиционирования	Электромагнитное излучение	Датчики	≤ 5
4	Видеокамеры	Различие с фоном	-	0.5 – 5

Как видно, всем требованиям соответ-
ствуют видеокамеры, если силуэт пользователя
явно отличается от фона. В качестве входных
данных они передают в СУТ последователь-
ные кадры, фиксирующие положения пользо-
вателя. Для определения скорости пользовате-
ля используется смещение его изображения от
фиксированной точки: чем больше величина
смещения в обрабатываемом кадре, тем боль-
ше отклонение скорости пользователя от ско-
рости БПТ.

Процесс управления эксплуатируемых
БПТ с наблюдателями построен на передаче
текущих кадров $data_t$ в СУТ напрямую и изме-
нении скорости БПТ согласно смещению поль-
зователя в каждом кадре (рис. 1а). При исполь-

зовании прогнозирования движения пользо-
вателя в СУТ передаются кадры выбранных мас-
сивов повторяющихся движений пользователя
(рис. 1б), т.е. СУТ реагирует не на реальное, а
на спрогнозированное положение пользовате-
ля, что позволяет частично или полностью
компенсировать запаздывание реакции БПТ.
Для выбора конкретного массива повторяю-
щихся движений пользователя и его кадров для
передачи в СУТ необходимо каждому из них
поставить в соответствие число – характери-
стику кадра, определяющую его содержание.
Если ни один массив еще не выбран, управле-
ние осуществляется в стандартном режиме –
аналогично рисунку 1а.

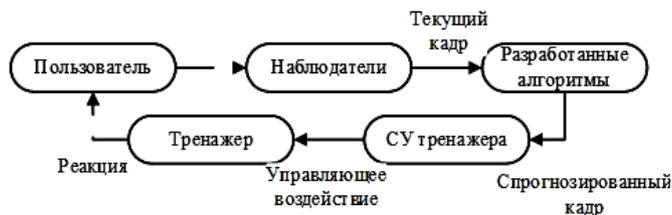
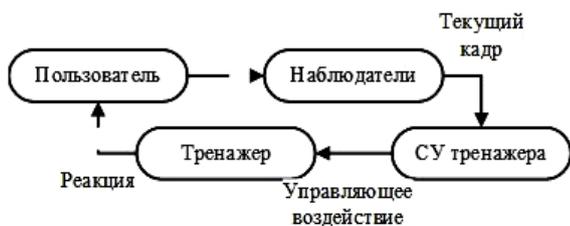


Рисунок 1. Схема процесса управления беговыми платформами тренажеров

Figure 1. Diagram of the control process of running platforms of simulators

Теоретические основы

Постановка задачи: на основе результа-
тов анализа текущего кадра-положения пользо-
вателя $data_t$ выбрать из БМПДП единствен-
ный массив повторяющихся движений пользо-
вателя D_i , в результате передачи определенного
кадра которого в СУТ вместо текущего кадра

обеспечивается минимум запаздывания реак-
ции БПТ на движения пользователя:

$$\Theta(D_i) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\text{где } D_i = \{d_{ij}\}, j = 1, \dots, J_i; D_i \in \text{БМПДП} = \{D_k\}, k = 1, \dots, K; \quad (2)$$

$$d_{ij} = \{data_{ij}, [\min|data_{ij}|, \max|data_{ij}|]\}; \quad (3)$$

$data_{ij} \in data^H = \{data^H\}, l = 1, \dots, L$ – кадр от наблюдателя в палитре [B,G,R] из множества

ранее зафиксированных последовательных кадров-положений пользователя;
 $[\min|data_{ij}|, \max|data_{ij}|]$ – область допустимых значений характеристик кадра $data_{ij}$ элемента d_{ij} массива D_i : если характеристика текущего кадра

$$|data_t| \in [\min|data_{ij}|, \max|data_{ij}|], \quad (4)$$

то его можно заменить на $data_{ij}$.

Использование области значений характеристик кадров позволяет минимизировать влияние произвольных движений пользователя: не требуется идеальное повторение движений, а допустимы незначительные отклонения до 5 %.

Общая схема решения задачи (1)-(3) включает операции: обработки входных кадров, формирования БМПДП, выбора массива D_i для передачи в СУТ.

Обработка входных кадров от наблюдателей включает удаление дефектов, определение характеристик кадров и формирование массива пар

$$Data = \{data_l^H, |data_l^H|\}, \quad l = 1, \dots, L, \quad (5)$$

включающего зафиксированные последовательные кадры-положения пользователя и значения их числовых характеристик.

Формирование массивов повторяющихся движений пользователя начинается с выявления закономерностей в последовательностях элементов массива $Data$. Далее определяется число J_m кадров в каждой из них и проверяется выполнение условий

$$J_m \geq \Theta_0 \cdot v, \quad m \in [1, \dots, M], \quad (6)$$

$$M > 1, \quad (7)$$

где Θ_0 – начальное запаздывание реакции БПТ (постоянная величина для каждого тренажера): в момент получения кадра $data_t$ тренажер реагирует на кадр $data_{t-\Theta_0 \cdot v}$, полученный на Θ_0 секунд раньше, а СУТ сформирует реакцию на полученный кадр $data_t$ только через Θ_0 секунд; v – скорость передачи камерами-наблюдателями кадров-положений пользователя в СУТ (кадров/с);

M – число выявленных закономерностей (если какому-либо значению J_m соответствует единственная закономерность, то она исключается из рассмотрения, т.к. ее нельзя считать закономерностью).

Закономерности, для которых выполняются условия (6), (7), группируются по признаку числа кадров в них: формируются множества

$$P_n = \{data_{nj}^H, |data_{nj}^H|\}, \quad n = 1, \dots, N_n, \quad j = 1, \dots, J_n, \quad (8)$$

$$N_n > 1,$$

где N_n – число закономерностей движения пользователя с одинаковым числом элементов J_n ,

и выбирается группа закономерностей, включающая максимальное количество кадров из массива $data^H$, которой соответствует максимум критерия

$$Q = N_n \cdot J_n / L, \quad (9)$$

где L – количество кадров в массиве $data^H$.

Из значений характеристик кадров выбранной группы закономерностей P_n формируются области их допустимых значений

$$\left[\min_{n=1, \dots, N_n} |data_{nj}^H|, \max_{n=1, \dots, N_n} |data_{nj}^H| \right], \quad j = 1, \dots, J_n, \quad (10)$$

а затем выделяется единственная закономерность по критерию максимума среднего значения характеристик их кадров

$$\sigma_n = \frac{1}{J_n} \sum_{j=1}^{J_n} |data_{nj}^H|, \quad n = 1, \dots, N_n. \quad (11)$$

Из выделенной таким образом закономерности формируется массив D_i , помещаемый в БМПДП. Все кадры-положения пользователя, вошедшие в него, исключаются из массива $Data$ и процесс выявления закономерностей повторяется до тех пор, пока удастся сформировать более одной закономерности, удовлетворяющей (6).

Выбор из БМПДП массива D_i , определенный кадр которого будет передан в СУТ вместо реального кадра от наблюдателей $data_t$, осуществляется согласно (4). Если это условие выполняется для начальных кадров нескольких массивов D_i , проверка выполнения условия (4) осуществляется для последующих кадров до определения единственного массива.

Таким образом, необходимо сформировать БМПДП и выбрать из нее массив D_i повторяющихся движений пользователя, передача определенного кадра $data_{ij}$ элемента d_{ij} которого в СУТ вместо реального кадра от наблюдателей $data_t$ компенсирует запаздывание реакции БПТ на действия пользователя.

Методы исследования

Для повышения точности регистрации движений пользователя рекомендуется использовать не менее двух камер-наблюдателей, которые монтируются вдоль продольной и поперечной осей БПТ, что позволяет оценивать смещение пользователя в двух плоскостях одновременно. Для получения адекватного изображения пользователя наиболее удобно использовать монотонный цветовой фон, например, хромакей [9], и равномерное и постоянное освещение. Использование хромакея позволит получить

фон одного цвета, т.е. все, что будет от него отличаться – это изображение пользователя. Если использование хромакея невозможно, необходимо сформировать шаблон фона, включающий все детали изображения, кроме силуэта пользователя, и исключать его из кадров. Использование камер-наблюдателей и хромакея позволяет комплектовать модифицированной СУТ уже эксплуатируемые тренажеры.

Кадры, получаемые от наблюдателей (рисунок 2а), сложны для анализа движения пользователя в реальном времени ввиду нали-

чия дефектов наблюдателей, таких как искажение линз, блики света, вибрация платформы. Для минимизации влияния дефектов наблюдателей применяется размытие кадров [10,11], которое позволяет убирать мелкие дефекты. Для удаления остаточных дефектов кадры переводятся в черно-белую цветовую гамму и определяется шаблон фона (рисунок 2б), который исключается из кадров, т.е. кадры, прошедшие обработку и используемые для формирования массивов повторяющихся движений пользователя, соответствуют рисунку 2в.



Рисунок 2. Обработка входных кадров от наблюдателей

Figure 2. Processing of input frames from observers

В качестве числовой характеристики входного кадра (рисунок 2а) использовано число черных пикселей этого кадра в черно-белом представлении (рисунок 2в), т.е. элементами множества $Data$, см. (5), являются пары: входной кадр от наблюдателей (рисунок 2а) и количество черных пикселей в соответствующем обработанном кадре (рисунок 2в).

Выявление закономерностей в последовательностях элементов массива $Data$ осуществляется в цикле r значений характеристик элементов $Data$: значение r последовательно уменьшается от $\max|data_i^h|$ до $\min|data_i^h|$. Элементы, значения характеристик которых не меньше текущего значения r , исключаются из рассмотрения, т.е. закономерность может начаться с элемента, характеристика которого меньше r , а заканчивается, когда характеристика следующего по порядку элемента больше или равна r . Если при фиксированном значении r будет выявлена единственная закономерность (включающая все элементы массива $Data$), то соответствующее значение r исключается из рассмотрения.

По окончании просмотра элементов массива $Data$ из закономерностей, для которых выполняются условия (6), (7), формируются множества P_n , $n = 1, \dots, N_n$ и исключаются закономерности, которым соответствует $N_n = 1$. Из оставшихся выбирается группа, которой соответствует максимальное значение критерия Q ,

см. (9), определяются области допустимых значений характеристик кадров этой группы, см. (10), и выделяется закономерность, которой соответствует максимум критерия σ_n , см. (11). Из этой закономерности формируется массив D_i , помещаемый в БМПДП.

После добавления в базу данных найденного массива D_i из $Data$ исключаются элементы, кадры которых вошли в D_i , и в усеченном массиве $Data$ снова осуществляется поиск массивов повторяющихся движений пользователя. По окончании обработки массива $Data$ будут определены и внесены в БМПДП уникальные массивы D_i : ни один из элементов любого из них не включает кадры $data_i^h$ из других.

Выбор конкретного элемента массива D_i , кадр $data_{ij}$ которого будет передан в СУТ вместо реального кадра от наблюдателей $data_t$ осуществляется по результату определения максимально возможного времени компенсации запаздывания реакции тренажера

$$\Theta_i = \Theta_0 - (J_i - t_i)/V, \quad (12)$$

где t_i – число элементов массива D_i , использованное в процессе его выбора.

Если $\Theta_i > 0$, то передача в СУТ кадра любого элемента выбранного массива может лишь частично компенсировать запаздывание реакции БПТ. Подобная ситуация возникает, если скорость передачи данных от наблюдателей недостаточна или (и) программно-аппаратное обеспечение не оптимизировано с точки зрения

продолжительности обработки данных. В этой ситуации в систему управления тренажера передается последний кадр массива D_i

$$\Theta_i > 0 \Rightarrow data_t \rightarrow data_{i,J_i}. \quad (13)$$

Если же $\Theta_i \leq 0$, то передача в СУТ кадра одного из элементов выбранного массива D_i может полностью компенсировать запаздывание реакции БПТ на действия пользователя (реакции БПТ на движения пользователя будут мгновенными)

$$\Theta_i \leq 0 \Rightarrow data_t \rightarrow data_{i,c}, \quad (14)$$

где $c = \Theta_0 \cdot v + t_i$ – номер элемента массива D_i , передача кадра которого в СУТ полностью компенсирует запаздывание.

Полная компенсация обеспечивает мгновенную реакцию БПТ на движения пользователя, частичная не обеспечивает мгновенной реакции, но повышает безопасность процесса подготовки.

Результаты исследования

Для тестирования программных модулей, реализующих вышеописанные алгоритмы, использовались видеопотоки тренировок пользователей, снятые при скорости передачи кадров камерами-наблюдателями $v = 30$ кадров/с. На вход модуля обработки входных кадров подавались объединения кадров, полученных одновременно с фронтальной и боковой камер,

см. рисунок 2а. Видео пользователя, выбранное для тестирования программного обеспечения содержало 9000 кадров (300 с) разрешением $[1280 \times 480 \times 3]$, где 1280×480 – число пикселей по горизонтали и вертикали кадра, 3 – $[B,G,R]$ – количество цветовых каналов каждого пикселя. Для минимизации фоновых помех оператор вручную ограничивал рабочую область БПТ, что, в совокупности с размытием, позволило уменьшить разрешение объединенных кадров до $[790 \times 440 \times 3]$. После перевода кадров в черно-белое представление и определения количества черных пикселей каждого из них был сформирован массив $Data$, включающий 9000 элементов: пар входных кадров-положений пользователя и значений их числовых характеристик.

На рисунке 3 представлены характеристики кадров группы из $N_n = 21$ закономерностей, включающих $J_n = 29$ элементов, выбранная из 14 групп, сформированных в результате первичного просмотра массива $Data$ по критерию (9): $Q = 0.067$. Здесь же представлены характеристики кадров и области их допустимых значений для шаблона-массива D_1 сформированного из закономерности, которой соответствует максимум критерия (11): $\sigma_n = 46257.8$.

№	Зак. №1	Зак. №2	Зак. №3	Зак. №4	...	Зак. №20	Зак. №21	Массив D1	Область значений
1	46981	47399	47005	46927	...	47856	47907	47623	[46927, 47952]
2	45992	46324	46146	46300	...	46630	47460	47072	[45992, 47817]
3	46106	46524	46063	46084	...	46659	46477	46742	[46063, 47808]
4	46428	46240	45990	46029	...	46811	46319	46707	[45990, 47644]
5	46769	46210	45714	46301	...	46557	45769	46596	[45714, 47906]
6	46624	45798	45636	46271	...	46614	45687	46467	[45636, 47897]
7	46584	45922	45870	46282	...	46132	45787	46317	[45787, 47723]
8	46117	45898	46296	46732	...	46224	45834	46298	[45834, 47666]
9	45990	46239	46445	46975	...	46188	45295	46467	[45295, 47583]
10	45716	46511	46812	47611	...	46514	45153	46812	[45153, 47684]
11	45501	47046	46880	47964	...	46672	45480	46907	[45480, 47964]
12	45857	47454	47669	47545	...	47042	46581	47045	[45857, 47723]
13	46991	47318	47200	47780	...	47652	46921	47271	[46184, 47862]
14	46981	47782	47204	47392	...	47978	46955	47201	[46095, 47978]
15	47138	47675	46479	46407	...	47109	47083	46619	[45861, 47881]
16	47040	47434	46517	46492	...	46758	46884	46517	[45543, 47889]
17	46492	47454	45993	46559	...	46480	46102	46324	[44878, 47494]
18	46510	47178	45266	45002	...	46117	46207	45591	[43814, 47178]
19	46604	46307	45074	44791	...	45725	45095	45095	[43829, 46978]
20	46325	45594	44797	44540	...	45206	43820	45005	[43820, 46578]
21	45165	45333	44502	44582	...	45317	44043	44787	[43909, 46268]
22	44680	45177	44292	44528	...	45260	43591	44620	[43591, 46051]
23	44939	44953	44236	44734	...	45130	43610	44854	[43610, 45967]
24	44521	45368	44965	45104	...	45350	43739	45081	[43739, 46065]
25	44629	45655	45325	44884	...	45577	43957	45243	[43957, 46387]
26	45105	46175	45940	45286	...	46173	44399	45677	[44399, 47082]
27	45926	46979	46900	46061	...	46568	44955	46061	[44955, 47599]
28	46877	47477	47070	47039	...	46980	46089	46921	[45738, 47856]
29	47557	47675	47787	47682	...	47870	47077	47557	[46339, 47928]

Рисунок 3. Результат выбора группы закономерностей и шаблона-массива

Figure 3. The result of selecting a group of patterns and an array template

После добавления найденного массива в БМПДП элементы, соответствующие ему, были удалены из массива *Data* и поиск массивов повторяющихся движений пользователя продолжался, пока удавалось находить закономерности, удовлетворяющие условиям (6)-(8). В результате были найдены и добавлены в БМПДП еще 17 массивов повторяющихся движений пользователя.

В проведенном исследовании для однозначного выбора массива повторяющегося движения пользователя потребовалось проверить выполнение условия (4) для $t = 5$ последовательных кадров-положений пользователя $data_t^H$ (0.167 с). Максимальное время компенсации запаздывания, согласно (12):

$$\Theta = \Theta_0 - (29 - 5)/30 = \Theta_0 - 0.8 \text{ с}$$

Следовательно, если Θ_0 соответствует минимальному значению из табл. 1 (0.43 с), использование предлагаемой методики прогнозирования движений пользователя позволит полностью компенсировать запаздывание: передача в СУТ кадра $data_{ic}$, $c = 0.43 \cdot 30 + 5 = 13$ вместо текущего кадра от наблюдателей $data_t$ компенсирует запаздывание реакции БПТ на 100 %.

Если же Θ_0 соответствует максимальному значению из таблицы 1 (2 с), то его удастся уменьшить до $\Theta = 1.2$ с: передача в СУТ вместо $data_t$ кадра $data_{i,29}$ компенсирует запаздывание реакции БПТ на 40 %.

Пополнение БМПДП новыми массивами осуществляется в нерабочее время путем передачи видеопотока с тренировок в разработанные программные модули обработки входных кадров и формирования массивов повторяющихся движений пользователя. При отрицательном результате поиска массивов повторяющихся движений пользователя необходимо увеличить объем видеопотока с тренировки, оптимизировать программно-аппаратное обеспечение с точки зрения скорости. Если пользователь совершает какое-либо нестандартное движение, не предусмотренное массивами,

Исследования выполнены при поддержке гранта РФ № 22-71-10057, <https://rscf.ru/project/22-71-10057/>.

имеющимися в БМПДП, система управления работает без прогнозирования, см. рисунок 1а.

Выводы

Предложена методика модификации системы управления УИФН, включающая:

- математическую постановку задачи управления беговым полотном действующего тренажера, решение которой позволяет компенсировать запаздывание его реакций на движения пользователя;

- алгоритм обработки входных кадров камер-наблюдателей, реализующий операции размытия кадров для удаления мелких дефектов и определение их числовых характеристик – числа черных пикселей в черно-белом представлении;

- алгоритм систематизации движений пользователя на беговой платформе тренажера с наблюдателями, результатом реализации которого является БМПДП, содержащая массивы повторяющихся движений пользователя;

- алгоритм прогнозирования движения пользователя на беговой платформе тренажера, результатом реализации которого является выбор из БМПДП массива повторяющихся движений пользователя, передача кадра определенного элемента которого в СУТ позволяет частично или полностью компенсировать запаздывание реакции беговой платформы тренажера на движения пользователя.

Тестирование программных модулей, реализующих разработанные алгоритмы, с использованием видеопотока тренировок конкретного пользователя показало, что за 0.167 с (при скорости передачи кадров камерами-наблюдателями 30 кадров/с) можно выбрать массив повторяющихся движений пользователя, ранее сформированный на основе 21 закономерности и спрогнозировать его движения на период до 0.8 с, обеспечив таким образом полную компенсацию минимального запаздывания СУТ $\Theta_0 = 0.43$ с и частичную – максимального запаздывания $\Theta_0 = 2$ с.

The research was carried out with the support of the RNF grant No. 22-71-10057, <https://rscf.ru/project/22-71-10057/>.

Литература

1. Hedjazi, N. An omnidirectional platform design: application to posture analysis / N. Hedjazi, A. Benali, M. Bouzit, Z. Dibi // XIV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing. – 2016. – Vol. 57. – pp. 602-607.

2. Lee, H. Design of the omnidirectional treadmill based on an omni-pulley mechanism / H. Lee, S. Pyo, S. Park, J. Yoon // 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence. – 2016. – pp. 889-894.
3. Lichtenstein, L. A feedback-controlled interface for treadmill locomotion in virtual environments / L. Lichtenstein, J. Barabas, R.L. Woods, E. Peli // ACM Transactions on Applied Perception (TAP). – 2007. – Vol. 4, No.1. – pp.1-23.
4. de Luca, A. Motion control of the cybercarpet platform / A. de Luca, R. Mattone, P. R. Giordano et al. // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2012. – Vol. 20, No. 9 – pp. 1-18.
5. Pyo, S. Development of a novel omnidirectional treadmill-based locomotion interface device with running capability / S. Pyo, H. Lee, J. Yoon // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, No. 9. – p. 4223.
6. Souman, J. L. Making virtual walking real: Perceptual evaluation of a new treadmill control algorithm / J. L. Souman, P. R. Giordano, I. Frissen et al. // ACM Transactions on Applied Perception (TAP). – 2010. – Vol. 7, No. 2. – pp. 1-14.
7. Kikuchi, T. Gait Analysis with Automatic Speed-Controlled Treadmill / T. Kikuchi, K. Sakai, K. Ishiya // Journal of Robotics and Mechatronics. – 2015. – Vol. 27, No. 5. – pp. 528-534.
8. Auralius, M. An automatic speed control system of a treadmill with ultrasonic sensors / M. Auralius, J. Yoon // Journal of Institute of Control, Robotics and Systems. – 2011. – Vol. 17, No. 5. – pp. 505-511.
9. Yasuda, K. Thermo-key: human region segmentation from video / K. Yasuda, T. Naemura, H. Harashima // IEEE Computer Graphics and Applications. – 2004. – Vol. 24, No. 1. – pp. 26-30.
10. Сизиков, В.С. Предшествующая и последующая фильтрация шумов в алгоритмах восстановления изображений / В.С. Сизиков, Р.А. Экземпляров // Научно-технический вестник информационных технологий Санкт Петербургского государственного университета механики и оптики. – 2014. – № 1 (89). – С. 112-122.
11. Новиков, А.И. Исследование регуляризационного метода восстановления размытых изображений / А.И. Новиков, Н. О. Шамин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2020. – № 72. – С. 106-115.

References

1. N. Hedjazi, A. Benali, M. Bouzit, Z. Dibi (2016). An omnidirectional platform design: application to posture analysis. XIV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing, 57, 602-607. DOI: 10.1007/978-3-319-32703-7_116.
2. H. Lee, S. Pyo, S. Park, J. Yoon (2016). Design of the omnidirectional treadmill based on an omni-pulley mechanism. 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, 889-894. DOI: 10.1109/URAI.2016.7734002.
3. L. Lichtenstein, J. Barabas, R.L. Woods, E. Peli (2007). A feedback-controlled interface for treadmill locomotion in virtual environments. ACM Transactions on Applied Perception (TAP), 4,1,1-23. DOI:10.1145/1227134.1227141.
4. A. de Luca, R. Mattone, P. R. Giordano et al. (2012) Motion Control of the CyberCarpet Platform. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 20, 9, 1-18. DOI: 10.1109/TCST.2012.2185051.
5. S. Pyo, H. Lee, J. Yoon (2021). Development of a novel omnidirectional treadmill-based locomotion interface device with running capability. Applied Sciences, 11, 9, 4223. DOI: 10.3390/app11094223.
6. J. L. Souman, P. R. Giordano, I. Frissen et al. (2010). Making virtual walking real: Perceptual evaluation of a new treadmill control algorithm. ACM Transactions on Applied Perception (TAP), 7, 2, 1-14. DOI: 10.1145/1670671.1670675.
7. T. Kikuchi, K. Sakai, K. Ishiya (2015). Gait Analysis with Automatic Speed-Controlled Treadmill. Journal of Robotics and Mechatronics, 27, 5, 528-534. DOI: 10.20965/jrm.2015.p0528.
8. M. Auralius, J. Yoon (2011). An automatic speed control system of a treadmill with ultrasonic sensors. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 17, 5, 505-511. DOI: 10.5302/J.ICROS.2011.17.5.505.
9. K. Yasuda, T. Naemura, H. Harashima (2004). Thermo-key: human region segmentation from video. IEEE Computer Graphics and Applications, 24, 1, 26-30. DOI: 10.1109/MCG.2004.1255805.
10. Sizikov, V.S. The preceding and subsequent noise filtering in image reconstruction algorithms / V.S. Sizikov, R.A. Copies // Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies of the St. Petersburg State University of Mechanics and Optics. – 2014. – № 1 (89). – Pp. 112-122.
11. Novikov, A.I. A study of the regularization method for restoring blurred images / A.I. Novikov, N. O. Shamin // Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University. - 2020. – No. 72. – pp. 106-115.

Сведения об авторах

ФИО	<i>Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)</i>
Карпушкин Сергей Викторович	доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», karp@mail.tstu.ru SPIN-код 1838-3229 ORCID 0000-0001-6886-0646 WoSResearcherID A-6490-2017 ScopusAuthorID 6506936856
Обухов Артем Дмитриевич	доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», obuhov.art@gmail.com SPIN-код 8948-8510 ORCID 0000-0002-3450-5213 WoSResearcherID M-9836-2019 ScopusAuthorID 56104232400
Сиухин Александр Андреевич	кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», младший научный сотрудник Управления фундаментальных и прикладных исследований, mr.siuhin@yandex.ru SPIN-код 2406-7691 ORCID 0000-0002-2810-8932 ScopusAuthorID 57205150427

Authors information

Last name, first name, patronymic	<i>Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)</i>
Karpushkin Sergei Viktorovich	Doctor of Technical Sciences, Professor, Tambov State Technical University, Professor of the Department of Computer Integrated Systems in Mechanical Engineering, karp@mail.tstu.ru SPIN- code 1838-3229 ORCID 0000-0001-6886-0646 WoSResearcherID A-6490-2017 ScopusAuthorID 6506936856
Obukhov Artem Dmitrievich	Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Tambov State Technical University, Associate Professor of the Department of Automated Decision Support Systems, obuhov.art@gmail.com SPIN- code 8948-8510 ORCID 0000-0002-3450-5213 WoSResearcherID M-9836-2019 ScopusAuthorID 56104232400
Siukhin Alexander Andreevich	Candidate of Technical Sciences, Tambov State Technical University, Junior Researcher at the Department of Fundamental and Applied Research, mr.siuhin@yandex.ru SPIN- code 2406-7691 ORCID 0000-0002-2810-8932 ScopusAuthorID 57205150427

статья поступила в редакцию
15.05.2024

одобрена после рецензирования
31.05.2024

принята к публикации
11.06.2024

the article was submitted
15.05.2024

approved after reviewing
31.05.2024

accepted for publication
11.06.2024

ЧАТ-БОТ КАК ВИРТУАЛЬНЫЙ ПОМОЩНИК ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЯВОК НА ОБСЛУЖИВАНИЕ

Людмила Анатольевна Коробова✉

1

Lyudmila_korobova@mail.ru

Юлия Игоревна Новикова

1

yulya.novi@yandex.ru

¹ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", проспект Революции, д. 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Люди контактируют между собой непрерывно, поэтому для коммуникации необходимо использовать максимально удобные способы. На сегодняшний день возможности для общения почти безграничны, ведь для начала диалога, человеку просто нужно достать смартфон и открыть приложение. Компании формируют запросы совершенно разными способами. В большинстве случаев это происходит либо посредством отправки заявки на почту, либо сотрудники просто приходят к специалисту, чем тратят свое рабочее время. Сотруднику технической поддержки это также совершенно неудобно, так как сложно систематизировать все заявки и соответственно сложно быстро и качественно обработать заявку. Для облегчения подачи и формирования заявки существует множество различных способов. Один из самых удобных и современных – это формирование заявки с помощью чат-бота. Нарастающая популярность мессенджеров и новых приложений, именуемых ботами, с помощью которых стала возможной автоматизация необходимых процессов, делают задачу разработки бота актуальной.

Ключевые слова: обработка заявки, коммуникации, приложения, мессенджер, чат-бот.

Для цитирования: Коробова Л. А., Новикова Ю. И. Чат-бот как виртуальный помощник формирования заявок на обслуживание // Инженерные технологии. 2024. № 2 (6). С. 45-53.

Review article

CHAT-BOT AS A VIRTUAL ASSISTANT FOR GENERATING SERVICE REQUESTS

Lyudmila A. Korobova ✉

1

Lyudmila_korobova@mail.ru

Yulia I. Novikova

1

yulya.novi@yandex.ru

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. People are constantly in contact with each other, so it is necessary to use the most convenient methods for communication. Today, the possibilities for communication are almost limitless, because to start a dialogue, a person just needs to take out a smartphone and open the application. Companies formulate requests in completely different ways. In most cases, this happens either by sending an application by mail, or employees simply come to a specialist, thereby wasting their working time. This is also completely inconvenient for a technical support employee, since it is difficult to systematize all requests and, accordingly, it is difficult to process the request quickly and efficiently. There are many different ways to make filing and completing an application easier. One of the most convenient and modern is creating an application using a chat bot. The growing popularity of instant messengers and new applications called bots, with the help of which it has become possible to automate the necessary processes, make the task of developing a bot relevant.

Keywords: application processing, communications, applications, messenger, chat-bot

For citation: Korobova L. A., Novikova Y. I. Chat-bot as a virtual assistant for generating service requests. *Ingenerye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (2 (6)): 45-53. (In Russ.).

Введение

Боты – это своего рода ассистент, диалог с которым происходит при помощи сообщений и команд. Они позволяют упростить и автоматизировать повседневные задачи, такие как получение необходимой информации, работа с электронной почтой, заказ такси и другие. Так же использование ботов удобно тем, что время на обработку запроса минимально и не требует дополнительных ресурсов. По данным пресс-службы «Мегафона» [1], лидируют по трафику

в сети компании среди мессенджеров: *WhatsApp* (58%), *Telegram* (32%), *Viber* (2%). В работе представлена разработка чат-бота для формирования заявок на обслуживание оборудования компании на платформе *Telegram* [2]. Особенностью ботов является диалоговый интерфейс и контекст.

В настоящее время различные компании все чаще стали внедрять чат-ботов, так как они позволяют автоматизировать бизнес-процессы, чем способны снизить нагрузку на службу поддержки [3]. Чат-боты, как новый ин-

струмент, позволяют минимизировать затраты компании. Причины, по которым компании все чаще предпочитают ботов живым людям следующие: мультизадачность, доступность и безопасность. К преимуществам чат-ботов относят: быстрота ответов на поставленные запросы; знакомый и удобный формат общения; быстрое обслуживание; круглосуточный доступ; оперативный отклик на обращения; выполнение однотипных часто повторяющихся действий при решении заявок или ответах на вопросы; автоматизация обслуживания; возможность работы на большом количестве платформ [3, 4].

Алгоритм работы чат-бота условно включает в себя следующие этапы.

- 1) Пользователь обращается в чат и дает задание боту.
- 2) Бот переправляет заявку на сервер.
- 3) На сервере анализируются все части запроса, и происходит поиск соответствий в базе данных (БД).
- 4) При положительном поиске сервер производит отправку ответа боту.
- 5) Бот воспроизводит полученный ответ в чате.

Правильную и адекватную работу бота при соответствующей конфигурации может гарантировать разработанная для определенной области применения чата БД. Поиск по БД программа-бот производит, имитируя применение искусственного интеллекта как работу человеческой мысли.

Методология

Разработка концептуальной модели. Для обоснования создания программного приложения-бота (ПП) проведен его анализ на концептуальном уровне [5]. Концептуальная модель дает понимание того, какими знаниями должны обладать все пользователи программы-бота. Выделены основные исполнители (актеры), взаимодействующие с ПП и прецеденты. Актеры – это любая сущность, выполняющая определенную роль в системе. Прецедент – действие, которое может выполнять актер в системе, чтобы достичь до результата своей цели.

Актерами в данной системе являются пользователи приложения – сотрудники компании, которым необходимо подать заявку на обслуживание, и администратор – специалист, который управляет всеми заявками [5, 6].

Для наглядного отражения взаимных связей и ответных действий между пользователями программы-бота использована простая, понятная и наглядная нотация. Простота выражается в том, что используется только две основные сущности – пользователи программы-бота и их взаимодействие. Понятность нотации выражается тем, что нет нагромождения большого количества элементов. Наглядность определяется использованием графического изображения представления диаграммы. Схема взаимных связей между пользователями программы-бота и характер их контактирования показан на диаграмме рисунка 1.

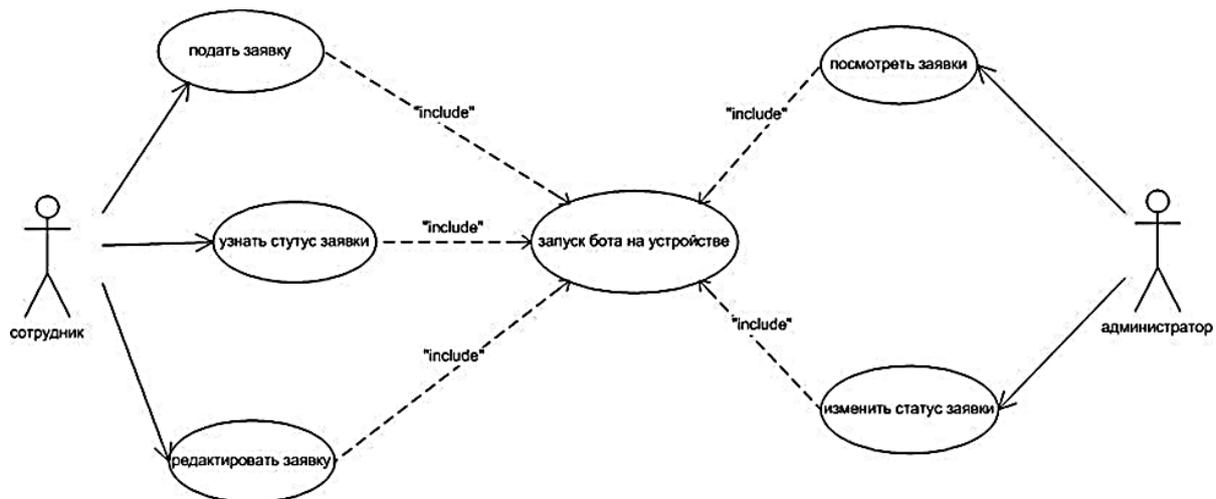


Рисунок 1. Диаграмма прецедентов

Figure 1. Use case diagram

Диаграмма прецедентов позволят проиллюстрировать поведение пользователей в соответствии с их действиями в рассматриваемом

процессе. Она наглядно визуализирует компоненты процесса с помощью стандартных изображений актеров (пользователей),

направленных стрелок и сочетания вариантов использования. Диаграмма дает представление для разработки модели рассматриваемого процесса на концептуальном уровне [5].

Как было показано выше, алгоритм работы чат-бота начинается с формирования заявки или запроса и затем запускается процесс функционирования бота [6, 7]. Поведение системы при формировании заявки визуализируем с помощью нотации диаграммы последовательности [5]. На диаграмме рисунка 2 в каче-

стве сущностей системы представлены сотрудник/пользователь, непосредственно бот и база данных. Отношения между сущностями показаны направленными стрелками с указанием сверху над ними обмен какой информацией происходит. Таким образом, на рисунке 2 показан протокол сеанса процесса подачи заявки на исполнения, т.е. запуска бота или обращения пользователя в чат и до выдачи номера заявки пользователю после сохранения ее в системе или БД.

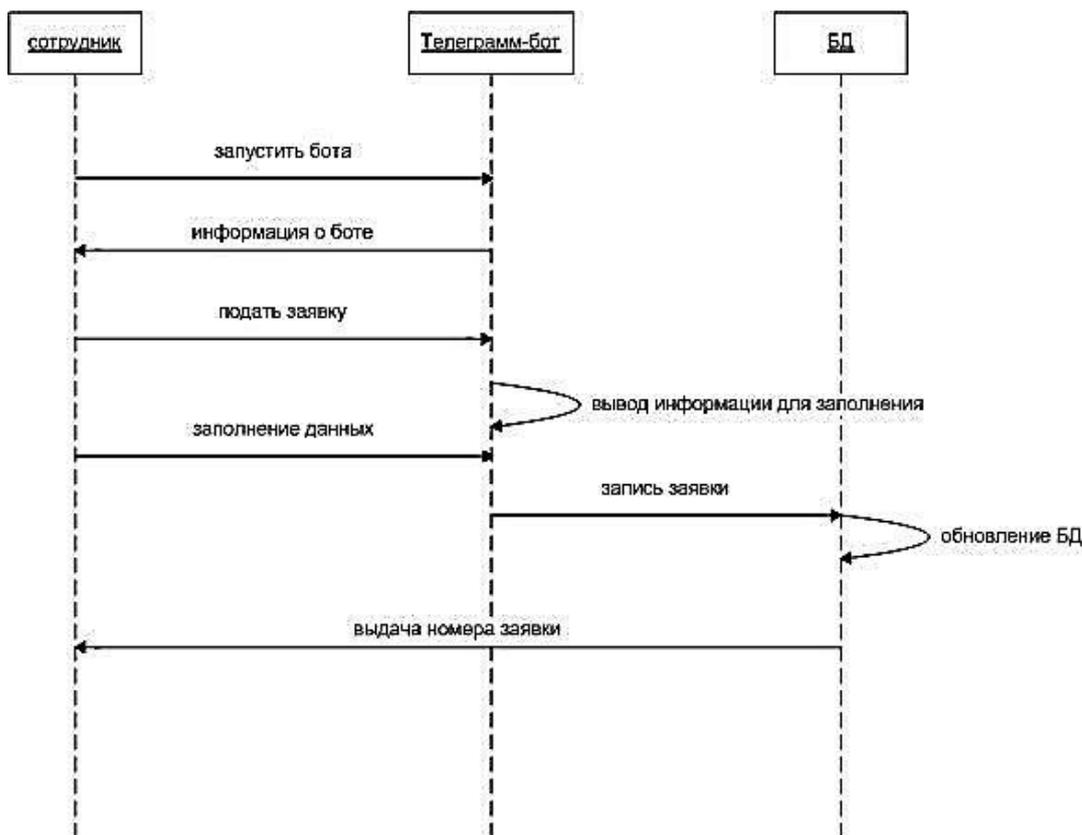


Рисунок 2. Диаграмма последовательности прецедента «подать заявку»

Figure 2. Sequence diagram of the “submit application” use case

Модели на диаграммах рисунков 1 и 2 процесса работы программы-бота позволили представить бота на уровне понятий информационной среды. Основным назначением бота является помощь сотрудникам компании в рутинной однотипной работе при ответе на вопросы с использованием искусственного интеллекта и применением для этого современных средств разработки.

Методы и средства

Разработка чат-бота включает и регистрацию его в социальной сети, в частности в *Telegram*. Это необходимо для того, чтобы получить уникальный ключ (токен - набор слу-

чайных символов для обращения к *HTTP API Telegram Bot*), необходимый для идентификации бота [8, 9]. Для этого существует специальный бот-конструктор «*BotFather*».

Создание нового бота начинается с первой и главной команды «*/newbot*», после чего предлагается ввести имя бота, по которому пользователи будут находить его. Условием ввода имени является то, что название должно заканчиваться на «*Bot*» или «*_bot*». После успешного ввода наименования «*BotFather*» выдаст токен и *URL*-адрес для доступа к боту [4, 8].

Пример регистрации чат-бота представлен на рисунке 3.

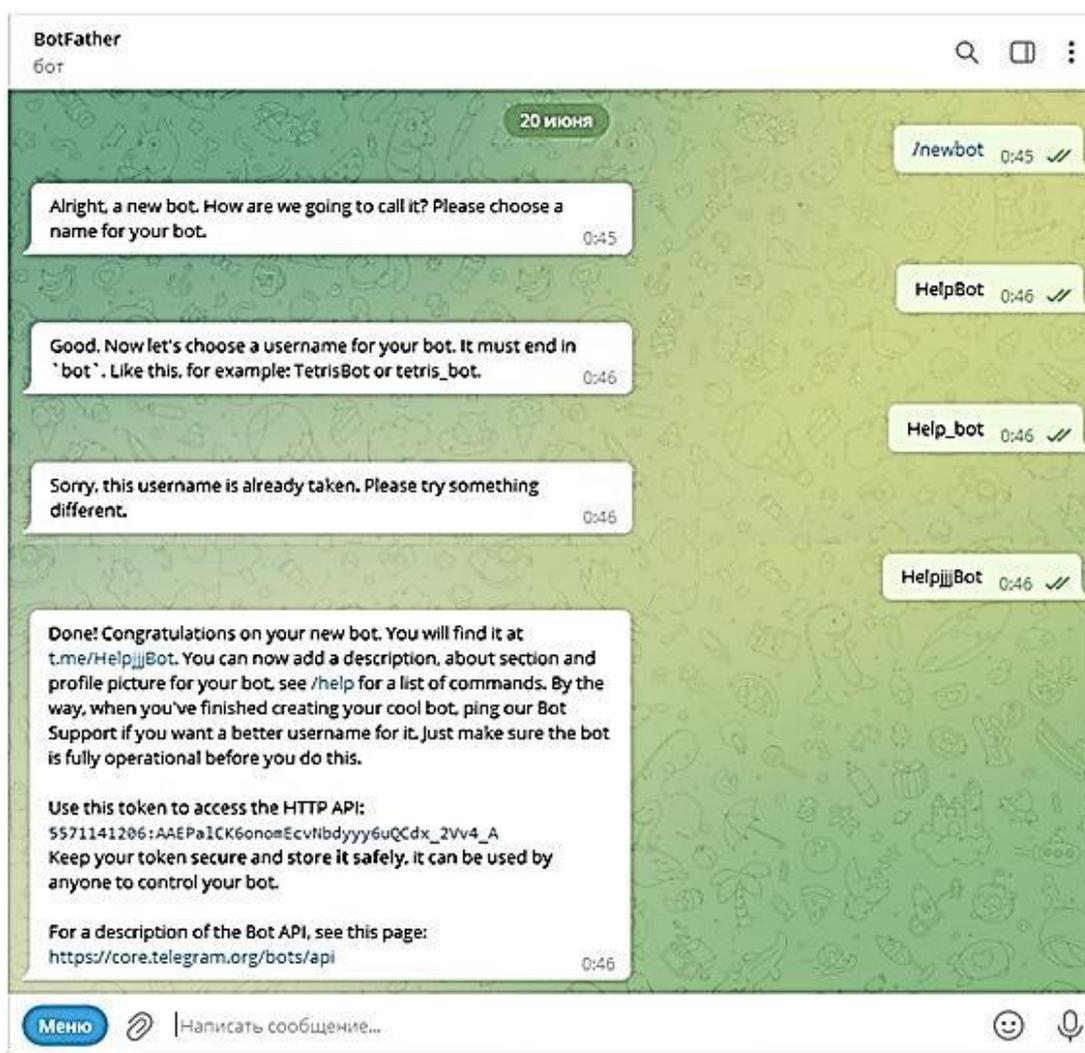


Рисунок 3. Пример регистрации бота

Figure 3. Example of bot registration

После ввода имени предлагается обширный список команд, с помощью которых можно добавить фото к чат-боту, его описание и др.

Список дополнительных команд для редактирования представлен в таблице 1.

Таблица 1. Список дополнительных команд для изменения чат-ботов [4]

Table 1. List of additional commands for changing chatbots [4]

Команда / Command	Описание / Description
/setname	Изменение имени бота
/setdescription	Присваивает текст, который будет отображаться при первом открытии чат-бота
/setabouttext	Присваивает информацию о чат-боте
/setuserpic	Добавляет «аватарку» к чат-боту
/setcommands	Позволяет создать список доступных команд
/deletebot	Удаляет созданный бот

После настроек чат-бота на стороне Telegram и получении токена можно приступить к разработке и написанию функциональности бота [4, 8].

Реализация клиентской части чат-бота. Пользователи мессенджера Telegram могут

взаимодействовать с чат-ботами двумя способами:

- 1) отправка команд (/start, /help и других);
- 2) использование встроенной клавиатуры (inline keyboards).

Как показал опрос пользователей *Telegram* [2], наиболее удобный способ взаимодействия – это встроенная клавиатура. Она позволяет быстро сформировать запрос и так же быстро получить на него ответ, так как не будет никакой ошибки, которую пользователь может случайно допустить при обычном написании текста сообщения.

Чат-бот со встроенной клавиатурой, предназначенный для формирования заявок на обслуживание [6, 7], должен состоять из 3 различных меню:

- Подать заявку.
- Узнать статус заявки.
- Редактировать заявку.

В документации *TelegramBot API* [8, 10] сказано, что каждая клавиатура должна иметь один обязательный параметр – имя кнопки (*text*), и шесть необязательных – ссылка (*url*), обратные данные (*callback_data*), возможность встроенного запроса (*switch_inline_query*), возможность вывода клавиатуры из другого чата (*switch_inline_query_current_chat*), вызов описания запущенной игры (*callback_game*) и кнопка с возможностью покупки (*pay*) [3].

В данной разработке используется только один необязательный параметр – обратные данные (*callback_data*).

Пример реализации клавиатуры меню показан на рисунке 4.

```

elif call.data == 'menu':
    keyboard = types.InlineKeyboardMarkup()
    key_zayav = types.InlineKeyboardButton(text='Подать заявку', callback_data='NewZayavka')
    keyboard.add(key_zayav)
    key_status = types.InlineKeyboardButton(text='Узнать статус заявки', callback_data='Status')
    keyboard.add(key_status)
    key_redach = types.InlineKeyboardButton(text='Редактировать сведения по заявке', callback_data='Redach')
    keyboard.add(key_redach)
    bot.send_message(call.message.chat.id, text="Выберите службу:", reply_markup=keyboard)
    
```

Рисунок 4. Реализация клавиатуры «меню»

Figure 4. Implementation of the “menu” keyboard

Обсуждение результатов

Тестирование бота. При первом открытии диалога с чат-ботом автоматически отправляется команда «/start», которая обрабатывается ботом, и затем возвращает пользовате-

лю сообщение, заранее прописанное разработчиком (рисунок 5). Далее при отправке команды «/help» предлагается весь спектр возможностей бота (рисунок 6).



Рисунок 5. Стартовый интерфейс бота

Figure 5. Bot start interface

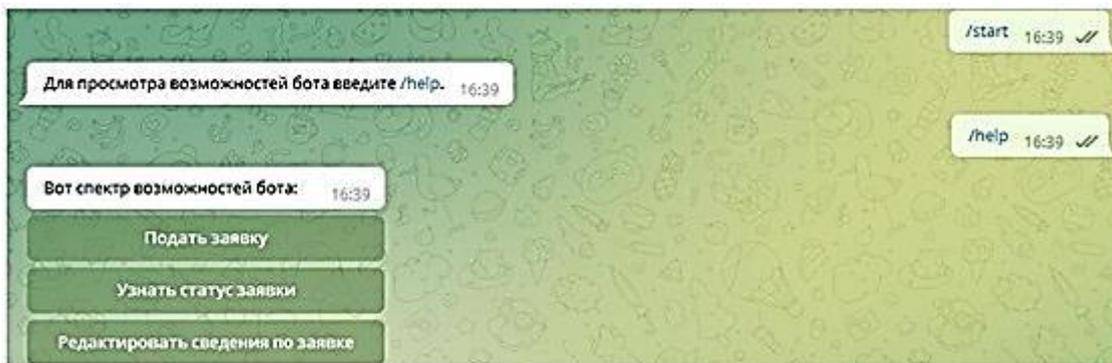


Рисунок 6. Интерфейс бота

Figure 6. Bot interface

Реализация данной части создана с помощью метода «sendMessage» и встроенной

клавиатуры «inline keyboards» (рисунок 7).

```
@bot.message_handler(content_types=['text'])
def get_text_messages(message):
    if message.text == "/help":
        keyboard = types.InlineKeyboardMarkup()
        key_zayav = types.InlineKeyboardButton(text='Подать заявку', callback_data='NewZayavka')
        keyboard.add(key_zayav)
        key_status = types.InlineKeyboardButton(text='Узнать статус заявки', callback_data='Status')
        keyboard.add(key_status)
        key_redach = types.InlineKeyboardButton(text='Редактировать сведения по заявке', callback_data='Redach')
        keyboard.add(key_redach)
        bot.send_message(message.from_user.id, text="Вот спектр возможностей бота:", reply_markup=keyboard)
```

Рисунок 7. Пример реализации клавиатуры

Figure 7. Example of keyboard implementation

В данном сообщении пользователю предлагается сделать выбор для дальнейшего формирования заявки. Для этого ему необходимо выбрать нужный пункт из предложенных ботом (рисунок 8).

Далее пользователь должен ввести необходимые данные для записи заявки (рисунок 9). В случае успешного заполнения всех необходимых данных, заявка сохраняется в базе данных, а пользователю возвращается сообщение с номером заявки.

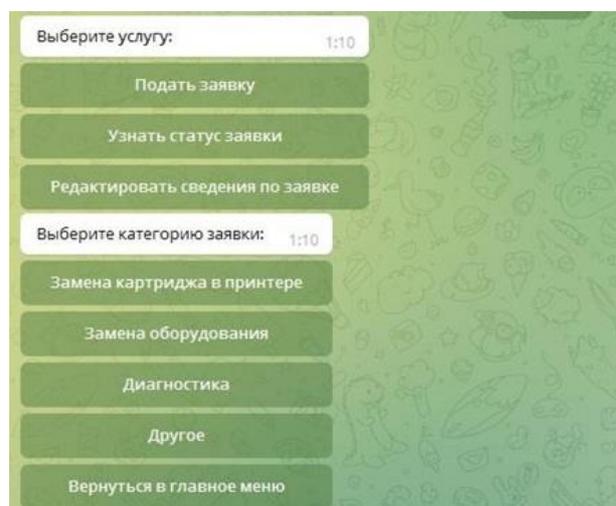


Рисунок 8. Пример работы чат-бота для выбора пункта меню

Figure 8. Example of a chat-bot working to select a menu item

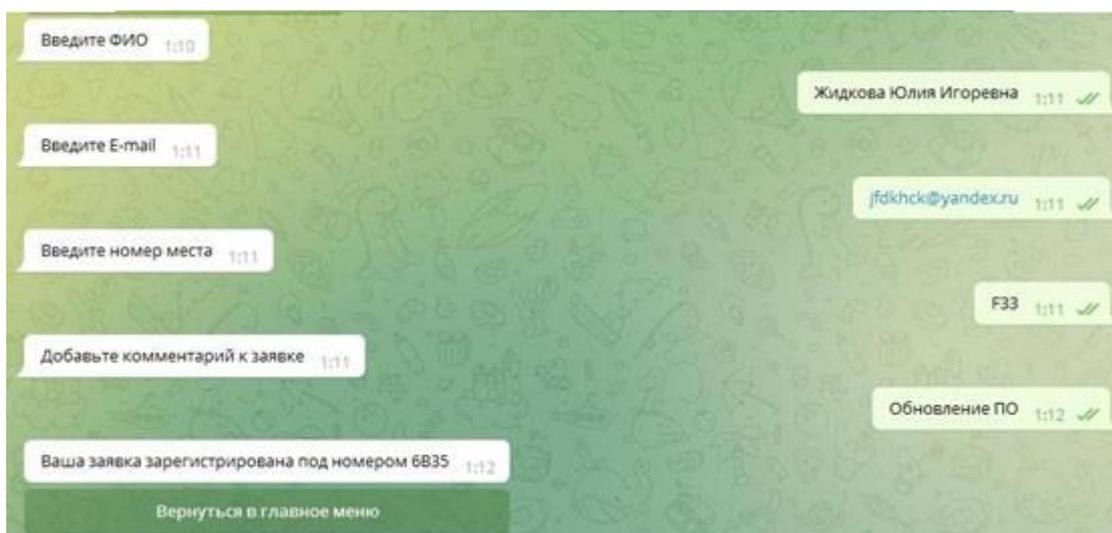


Рисунок 9. Пример работы чат-бота при заполнении данных

Figure 9. Example of how a chat-bot works when filling out data

В случае возникновения непредвиденных ошибок, таких как неправильный ввод номера заявки, то пользователю будет показано

сообщение об ошибке. Пример вывода сообщения показан на рисунке 10.

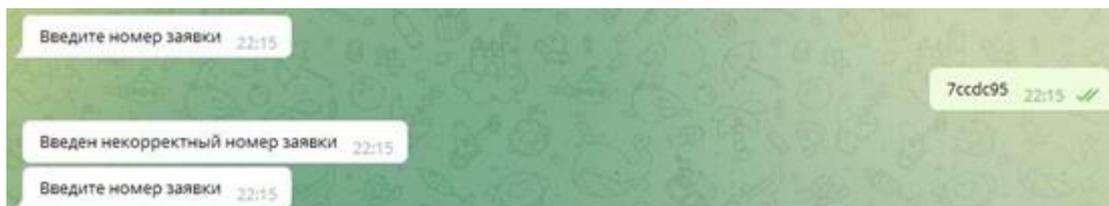


Рисунок 10. Пример вывода сообщения об ошибке

Figure 10. Example of error message output

Заключение

На сегодняшний день популярность мессенджеров как средств обмена сообщениями постоянно растет. Ежедневно почти все население пользуется возможностями мессенджеров, благодаря простоте и скорости ответа от собеседников. Вследствие чего растет и число ботов, поскольку они могут автоматизировать и упростить необходимые пользователю функции.

Таким образом, в работе проведено сравнение и анализ достоинств и недостатков

наиболее востребованных мессенджеров. Благодаря чему, был выбран мессенджер *Telegram*, как самый удобный, практичный, быстрорастущий и доступный в плане документации *Telegram Bot API*. Проведено обоснование функционирования программного приложения и разработана его концептуальная модель. Описан процесс регистрации бота в *Telegram*, а также реализация клиентской части. Приведен пример апробации разработанного приложения.

Литература

1. Рейтинг мессенджеров 2022 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://tass.ru/ekonomika/10544793>
2. Официальный сайт Telegram [Электронный ресурс]: API – Режим доступа: <https://core.telegram.org/api>
3. Цифровизация внутрикорпоративных коммуникаций / И. А. Зубцов, П. В. Дерюгин, Д. Ю. Панарин [и др.] // Стратегия и тактика управления предприятием в переходной экономике: сборник материалов XX ежегодного открытого конкурса научно-исследовательских работ студентов и молодых ученых в области экономики и управления, Волгоград, 01–30 апреля 2020 года. Том Выпуск 40. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2020. – С. 42-44. – EDN BTVRCK.
4. Матвеева Н. Ю., Технологии создания и применения чат-ботов [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/tehnologii-sozdaniya-i-primeneniya-chat-botov>
5. Абрамов, Г. В. Проектирование информационных систем: Учебное пособие / Г. В. Абрамов, И. Е. Медведкова, Л. А. Коробова. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2012. – 172 с. – ISBN 978-5-89448-953-7. – EDN ZVCUUV.
6. Коробова, Л. А. Методы обработки ИТ-заявок в телекоммуникационной компании / Л. А. Коробова, И. А. Матыцина, Д. С. Маликов // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : Сборник трудов Международной научной конференции – Воронеж: Общество с ограниченной ответственностью "Вэлборн", 2022. – С. 1610-1618. – EDN ZXNLAV.
7. Лунева, Н. А. Моделирование процесса обработки заявок в службе технической поддержки / Н. А. Лунева, И. С. Толстова, Л. А. Коробова // Моделирование энергоинформационных процессов: Сборник статей VIII национальной научно-практической конференции с международным участием – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2020. – С. 510-514. – EDN ACSEGD.
8. Telegram Bot API [Электронный ресурс]: Telegram Documents. – Режим доступа: <https://core.telegram.org/bots/api>
9. Developing a learning system with gamification elements / L. Korobova, I. Tolstova, S. Chernyaeva [et al.] // Proceedings II International Scientific Conference on Advances in Science, Engineering and Digital

Education (ASEDU-II-2021) : Conference Proceedings, Krasnoyarsk, 28 октября 2021 года. Vol. 2647 А. – Krasnoyarsk: AIP PUBLISHING, 2022. – P. 50012. – DOI 10.1063/5.0104273. – EDN GCDPXD.

10. Prototype mobile application definitions fresh products based on neural network / L. A. Korobova, I. S. Tolstova, I. A. Matytsina, M. S. Mironova // *Journal of Physics: Conference Series : Current Problems*, Voronezh, 07–09 декабря 2020 года. – Voronezh, 2021. – P. 012118. – DOI 10.1088/1742-6596/1902/1/012118. – EDN XIEBCT.

References

1. Rating of messengers 2022 [Electronic resource] Access mode: <https://tass.ru/ekonomika/10544793>
2. Official Telegram website [Electronic resource]: API – Access mode: <https://core.telegram.org/api>
3. Digitalization of internal corporate communications / I. A. Zubtsov, P. V. Deryugin, D. Yu. Panarin [etc.] // *Strategy and tactics of enterprise management in a transition economy: collection of materials of the XX annual open competition of scientific research works of students and young people scientists in the field of economics and management*, Volgograd, April 01–30, 2020. Volume Issue 40. – Volgograd: Volgograd State Technical University, 2020. – P. 42-44. – EDN BTVRCK.
4. Matveeva N. Yu., Technologies for creating and using chat bots [Electronic resource] Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/v/tehnologii-sozdaniya-i-primeneniya-chat-botov>
5. Abramov, G.V. Design of information systems: Textbook / G.V. Abramov, I.E. Medvedkova, L.A. Korobova. – Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2012. – 172 p. – ISBN 978-5-89448-953-7. – EDN ZVCUUV.
6. Korobova, L. A. Methods for processing IT applications in a telecommunications company / L. A. Korobova, I. A. Matytsina, D. S. Malikov // *Current problems of applied mathematics, computer science and mechanics: Proceedings of the International Scientific Conference - Voronezh : Limited Liability Company "Welborn"*, 2022. – pp. 1610-1618. – EDN ZXNLAB.
7. Luneva, N. A. Modeling the process of processing applications in the technical support service / N. A. Luneva, I. S. Tolstova, L. A. Korobova // *Modeling of energy information processes: Collection of articles of the VIII national scientific and practical conference with international participation - Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2020. – pp. 510-514. – EDN ACSEGD.
8. Telegram Bot API [Electronic resource]: Telegram Documents. - Access mode: <https://core.telegram.org/bots/api>
9. Developing a learning system with gamification elements / L. Korobova, I. Tolstova, S. Chernyaeva [et al.] // *Proceedings II International Scientific Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education (ASEDU-II-2021) : Conference Proceedings*, Krasnoyarsk, 28 октября 2021 года. Vol. 2647 А. – Krasnoyarsk: AIP PUBLISHING, 2022. – P. 50012. – DOI 10.1063/5.0104273. – EDN GCDPXD.
10. Prototype mobile application definitions fresh products based on neural network / L. A. Korobova, I. S. Tolstova, I. A. Matytsina, M. S. Mironova // *Journal of Physics: Conference Series : Current Problems*, Voronezh, 07–09 декабря 2020 года. – Voronezh, 2021. – P. 012118. – DOI 10.1088/1742-6596/1902/1/012118. – EDN XIEBCT.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Коробова Людмила Анатольевна	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", доцент кафедры «Информационных технологий, моделирования и управления», Lyudmila_korobova@mail.ru SPIN-код 1098-6488 ORCID 0000-0003-1349-732X Scopus Author ID: 57202287474
Новикова Юлия Игоревна	студентка, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", студентка «Информационных технологий, моделирования и управления», yulya.novi@yandex.ru

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (<i>academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors</i>)
Korobova Ludmila Anatolievna	PhD, Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, Associate Professor of the Department of Information Technology, Modeling and Management, Lyudmila_korobova@mail.ru SPIN- code 1098-6488 ORCID 0000-0003-1349-732X Scopus Author ID: 57202287474
Novikova Julia Igorevna	Student, Voronezh State University of Engineering Technologies, student of Information Technology, Modeling and Management, yulya.novi@yandex.ru

статья поступила в редакцию 13.04.2024	одобрена после рецензирования 22.04.2024	принята к публикации 13.05.2024
the article was submitted 13.04.2024	approved after reviewing 22.04.2024	accepted for publication 13.05.2024

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙСемен Леонидович Подвальный¹ spodvalny@yandex.ru
Светлана Анатольевна Малюкова¹✉ rio_svetlana@mail.ru¹Воронежский государственный технический университет ул. 20-летия Октября, 84, г. Воронеж, 394006, Россия

Аннотация: в настоящей статье дан анализ публикаций 2023 г. по направлению «Информатика, вычислительная техника и управление» на примере одного из региональных журналов из списка ВАК: «Вестник Воронежского государственного технического университета». С учетом научных специальностей, по которым сертифицирован журнал, дана классификация и статистика публикаций. В основной части проведен краткий обзор публикаций по ключевым словам, аннотациям, числу соавторов, числу организаций и другим общепринятым статистикам eLibrary при анализе публикационной активности.

Ключевые слова: моделирование, управление, оптимизация, математическая модель, система, алгоритм, нейронные сети, генетический алгоритм, программа, база данных

Для цитирования: Подвальный С. Л., Малюкова С. А. Актуальные вопросы информационных технологий и телекоммуникаций // Инженерные технологии. 2024. № 2 (6). С. 54-63.

Review article

CURRENT ISSUES IN INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

Semyon L. Podvalny¹ spodvalny@yandex.ru
Svetlana A. Malyukova¹✉ rio_svetlana@mail.ru¹Voronezh State Technical University, 20-letiya Oktyabrya str., 84, Voronezh, 394006, Russia

Abstract: This article provides an analysis of publications in 2023 in the field of “Informatics, Computer Science and Management” using the example of one of the regional journals from the Higher Attestation Commission list: “Bulletin of the Voronezh State Technical University”. Taking into account the scientific specialties for which the journal is certified, classification and statistics of publications are given. The main part provides a brief overview of publications by keywords, abstracts, number of co-authors, number of organizations and other generally accepted eLibrary statistics when analyzing publication activity.

Keywords: modeling, control, optimization, mathematical model, system, algorithm, neural networks, genetic algorithm, program, database

For citation: Podvalny S. L., Malyukova S. A. Current issues in information technology and telecommunications. *Ingenerye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (2 (6)): 54-63. (In Russ.).

Введение

Задача настоящего обзора показать основные направления (труды) в общем научном направлении «Информатика, управление и вычислительная техника» на основании анализа публикаций за 2023 год.

Конечно, основной тренд задают журналы «Автоматика и телемеханика», «Проблемы управления», «Управление большими системами» и некоторые другие отраслевые и ака-

демические журналы. Но региональные издания, особенно журналы из списка ВАК, так или иначе следуют в общем фарватере.

Покажем это на примере одного из региональных журналов, издаваемого в г. Воронеж, например, «Вестник Воронежского государственного технического университета». За последние два года (2022-2023 гг.) вышло 12 номеров, публикации в которых распределились следующим образом (таблица 1).

Таблица 1. Количество публикаций в журнале по основным научным специальностям

Table 1. Number of publications in the journal in main scientific specialties

Научные специальности (технические науки) / Scientific specialties (technical sciences)	2022 год	2023 год
2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации	15	14
2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами	7	9
2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей	11	11
1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ	12	17

Что касается других научных специальностей общего научного направления 2.3, то они сертифицированы в других журналах ВГТУ и вузов г. Воронежа. Далее попытаемся систематизировать публикации с привязкой к научным специальностям и дадим их краткую характеристику, работы [1 - 51].

I. Системный анализ, управление и обработка информации

[3,7,14,18,31,34,38,39,40,41,44,45,47,49]

Подавляющее количество работ посвящено разработке моделей и алгоритмов управления обобщенного класса объектов, специфика которых требует в каждом отдельном случае индивидуального подхода.

В работах [3, 7, 18, 38] рассмотрены различные по своему смыслу прикладные задачи, в которых используются для принятия решений нейронные сети. Название работ говорит само за себя: диагноста заболеваний с помощью сверточных нейронных сетей [3, 7], которые используются для обработки изображений.

Далее нейронные сети в работе телефонных станций [18], нейронные сети в задачах прогнозирования расхода электроэнергии [38] - в данном случае речь идет рекуррентных нейронных сетях.

В системном анализе особую роль приобретают в настоящее время методы машинного обучения при обработке информации: исследование рейтинговых систем [14], конвейерная обработка данных в задаче логистики [31].

Модели и алгоритмы управления рассмотрены в работах [39, 40] на примере специальных объектов из различной области: мобильный робот [39], в системах компьютерного зрения [40, 49], графовых систем обработки данных [41], частотном электроприводе [42], при предикативном управлении химическим процессом [44], при управлении беспилотными летательными аппаратами [45], в задачах оптимизации на базе эволюционных методов [47].

Пример: Задача классификации изображений кожных заболеваний решалась на базе сверточных искусственных нейронных сетей (CNN). Предварительная подготовка изображений, оптимизация структуры исходной нейронной сети путем настройки части параметров разработанной нейронной сети были направлены на решение би-критериальной задачи: обеспечить уменьшение ресурсоемкости процесса обучения и приемлемую точность классификации. В заключении приведены структура и параметры настройки конечной версии сети, таблицы и графики работы на тестовой выборке [3].

II. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Если в предыдущем случае речь шла в основном о теоретическом подходе к решению задач управления, то здесь рассмотрены практические задачи автоматизации технологических процессов и производств. Объекты самые разные, в итоге алгоритмическое и техническое обеспечение тоже разное:

- в [5] главный объект: АСХТП дорожного строительства, основной подход – интеллектуальное управление, специфика алгоритмов: линейных этапов и их взаимосвязь. Специфика некоторых алгоритмов в [37].

- в [6] объект паровая турбина, регулирование нештатных ситуаций энергоблока АЭС, совокупность решаемых задач обеспечивается на базе возможностей Any Logic.

- в [12] рассмотрена подсистема принятия решений при управлении производства углеродных нанотрубок в составе общей информационной системы для получения требуемых значений параметра.

- в [24] изложены результаты экспериментов по улучшению аэродинамических характеристик, в том числе уменьшение веса за счет специальных расширяющих юбок.

- в [27] анализируется работа регулятора давления первого контура АЭС, подсистема является частью общего контура обеспечения безопасности работы.

- в [29] объект – мобильный робот с компенсацией возмущения. Система находится на стадии предпроектной реализации, используется моделирование средствами MATLAB.

- в [30] другой класс робототехнических систем с применением САД-систем.

- в [39] производство твердотельных реле и возможности АСХТП с интеграцией с верхним уровнем управления производством.

Пример: обоснована концепция управления варианта производства нанотрубок с заданными свойствами с использованием предлагаемой подсистемы поддержки принятия решений, являющейся частью общей информационной системы (ИС), которая способствует реализации синтеза наноструктур с заданными параметрами. Одновременно обеспечивается оперативность перехода к другим типам наноструктур. [12].

III. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

Если предыдущие разделы являются родственными и отличаются по сути теоретическими и практическими нюансами в общей

задаче управления, то здесь основной упор на точности реализации отдельных программных модулей в составе известных программных оболочек:

- в [2] речь идет о кодировании управляющих автоматов на базе ПЛИС в задаче передачи трафика.

- в [4] специфика разработки систем визуализации в задачах 3D-моделирования процесса полимеризации.

- в [8] рассмотрено специфическое математическое обеспечение для реализации ПО при управлении потоком заявок.

- в [11] ряд приложений в Microsoft Visual Studio для задачи экологической оценки объектов недвижимости в виде дополнительных модулей реализовано дополнительно.

- в [19] дополнительные программные модули разрабатываются для кросс-платформенных приложений в системе геометрического проектирования Open CASCADE.

- в [22] рассматривается система удаленного мониторинга в рамках технологии MESH в сочетании с Wi-Fi.

- в [25] анализируется специфика практической реализации 3D- моделирования в задачах макетирования изделий.

- [32] речь идет о создании проблемно-ориентированной программной оболочки для решения оптимизационных задач при управлении потоком заявок в многокритериальной постановке задачи.

- в [33] решается частная задача разработки ПО с использованием аналого-цифрового преобразования на базе синхронно-векторных измерений в системе GPS.

- в [46] исследуется задача создания ПО для тестового контроля автоматов конечного типа.

Пример, рассматривается проблема цифрового мониторинга в режиме реального времени субъектов генерации и передачи электроэнергии. Предлагается эффективный метод повышения наблюдаемости на базе технологий синхронно-векторных измерений, использующих синхронизацию времени глобальными позиционирующими системами. Описывается авторский прототип программно-аппаратного комплекса синхронно-векторных измерений на базе GPS-синхронизированного АЦП, реализующее процессы получения измерений, с доступом как по локальной, так и из внешней сети [33].

IV. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Это наиболее многочисленный раздел, всего в 2023 году опубликовано 17 статей. Это при том, что в работах предыдущих разделов I, II, III также активно использовались методы моделирования с доведением до конкретных алгоритмов и соответствующего ПО в практических задачах.

В общем случае, не прибегая к детальному анализу, работы этого раздела можно разделить на 2 большие группы:

а) разработка эффективных численных методов решения специальных задач;

б) моделирование конкретных объектов от разработки модельных соотношений до моделирующих систем.

В группе *a* отметим работы: [1], где сравниваются две схемы идентификации квази-линейных моделей; в [15] сравнивается быстродействие численных методов Гаусса и LUP приложения; в [16] речь идет о задачах идентификации нелинейных нестационарных систем; в [17] S-преобразование в задачах преобразования яркости.

Гораздо более многочисленна группа *б*. Здесь мы можем увидеть конкретные модели реальных объектов. Модели для описания свойства клинкера [20], бактериальные популяции [23], механические колебательные системы [26], материал с эффектом памяти формы [28], моделирование оболочек [36], интерактивные макеты жилых зданий [43], термоэлемент с охлаждением ламинарным потоком [48], обтекание сферы при малых числах Рейнольдса [51] и другие. Пример аннотации одной из работ приведен ниже.

«При помощи метода конечных элементов решены задача на собственные значения и смешанная краевая задача для системы связанных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающей колебания цилиндрического резонатора твердотельного волнового гироскопа с пьезоэлектрическими преобразователями. Проведена оценка минимально возможного времени выхода твердотельного волнового гироскопа на рабочий режим при заданных параметрах возбуждения» [10].

Заключение

Следует заметить, что в Вестнике Воронежского государственного технического университета опубликованы материалы исследований как авторов из Воронежа (ВГТУ,

ВГУ, ВГУИТ и др. – всего в Воронеже более 20 учебных заведений), так и из других технических и классических университетов следующих городов: Пенза, Новосибирск, Краснодар, Ростов, Таганрог, Липецк, Тамбов, Уфа, Казань, Москва, Симферополь.

Таким образом, можно говорить, что журнал отражает общую тенденцию публикаций в данной области.

Распределение по числу авторов опубликованных работ следующее: от 1 до 3 авторов – 36 работ или более 70%. По числу

соавторов 4 или 5 человек – всего 15 работ, что чуть менее 30%.

В заключении следует отметить, что все рассмотренные работы находятся в открытом доступе как в системе eLibrary (<https://www.elibrary.ru/contents.asp?titleid=9460>), так и на сайте журнала (<https://cchgeu.ru/science/nauchnye-izdaniya/vestnik-voronezhskogo-gosudarstvennogo-tekhnicheskogo-universiteta-/vypuski-zhurnala/>). Продолжение данной работы см. часть II.

Литература

1. Мишачев Н.М. Две схемы иерархической идентификации квазилинейных моделей / Н.М. Мишачев, А.М. Шмырин, А.П. Щербаков // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 1. 2023. С. 7-13.
2. Никишин К.И. Методика кодирования управляющих автоматов для передачи трафика в программно-конфигурируемой сети / К.И. Никишин // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 1. 2023. С. 14-19.
3. Михайлулов А.В. Использование сверточных нейронных сетей для диагностики рака кожи / А.В. Михайлулов // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 1. 2023. С. 20-27.
4. Резников К.Г. Разработка программного обеспечения для визуализации процессов полимеризации / К.Г. Резников, С.Л. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 2. 2023. С. 7-14.
5. Бурковский В.Л. Проблематика управления технологическими процессами в дорожном строительстве / В.Л. Бурковский, И.Н. Волков // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 2. 2023. С. 15-20.
6. Дударев Р.С. Исследование нештатной эксплуатации системы регулирования паровой турбины и ее моделирование на базе возможностей Any Logic / Р.С. Дударев, М.И. Чижов // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 2. 2023. С. 21-26.
7. Лихотин М.А. Использование свёрточных нейронных сетей для анализа изображений / М.А. Лихотин // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 2. 2023. С. 27-32.
8. Олейникова С.А. Разработка специального математического обеспечения системы управления потоком поступающих заявок / С.А. Олейникова, А.В. Дятчина // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 2. 2023. С. 33-37.
9. Киреев И.С. Математическое моделирование работы длинной линии на основе представления в качестве цепи с распределенными параметрами / И.С. Киреев, И.В. Зубарев, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 2. 2023. С. 38-44.
10. Моделирование электромеханических процессов в твердотельном волновом гироскопе с пьезоэлектрическими преобразователями / И.Л. Батаронов, Г.Е. Шунин, С.А. Кострюков, В.В. Пешков // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 2. 2023. С. 45-52.
11. Курипта О.В. Совершенствование экологической оценки объекта недвижимости методами программной инженерии / О.В. Курипта, Ю.А. Воробьева, О.В. Минакова // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 2. 2023. С. 53-60.
12. Буракова Е.А. Поддержка принятия решений при управлении производством углеродных нанотрубок с заданными параметрами / Е.А. Буракова // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 2. 2023. С. 61-67.
13. Егорова К.В. Имитационная модель управления полетом группы беспилотных летательных аппаратов на основе алгоритма пчелиной колонии / К.В. Егорова // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 2. 2023. С. 68-71.
14. Седых И.А. Определение оптимального набора переменных при помощи методов машинного обучения при исследовании рейтинговых систем / И.А. Седых, И.В. Стругов // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 2. 2023. С. 72-78.

15. Сеченов П.А. Сравнение быстродействия численных методов Гаусса и LUP-разложения в задаче нахождения равновесного химического состава / П.А. Сеченов // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 2. 2023. С. 79-85.
16. Тунг Хак Нгуен Алгоритм адаптивного оценивания параметров нелинейных нестационарных систем / Нгуен Хак Тунг // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 2. 2023. С. 86-93.
17. Начаров Д.В. Метод контрастирования изображений средствами модифицированного S-образного преобразования яркости / Д.В. Начаров // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 2. 2023. С. 94-102.
18. Разработка системы распознавания качества обслуживания клиентов с помощью технологии искусственных нейронных сетей / Д.А. Баранов, А.С. Тупицына, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, К.В. Зольников // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 3. 2023. С. 7-12.
19. Ахлестин А.И. Разработка масштабируемых кроссплатформенных приложений QML с интеграцией модуля геометрических построений Open CASCADE / А.И. Ахлестин, А.Н. Юров, М.И. Чижов // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 3. 2023. С. 13-16.
20. Щербаков А.П. Иерархическая квазилинейная модель прогнозирования свойств клинкера / А.П. Щербаков // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 3. 2023. С. 17. 22.
21. Бесконтактное диагностирование работающего автоматизированного технологического оборудования / В.Л. Мурзинов, Ю.В. Мурзинов, П.В. Мурзинов, Д.В. Кочерженко // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 3. 2023. С. 23-27.
22. Структура системы удаленного мониторинга микроклимата на базе ячеистой топологии / К.Ю. Филатов, В.В. Воробьев, Д.С. Булучевский, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 3. 2023. С. 28-35.
23. Шуай И. Дифференциальная модель коммуникации бактериальной популяции при эволюции дочерних колоний: конечно-элементная реализация / И. Шуай, А.Г. Масловская // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 3. 2023. С. 36-42.
24. Использование перфорации стабилизирующих расширяющихся «юбок» для улучшения аэродинамических характеристик летательных аппаратов / В.Т. Калугин, М.Д. Калугина, А.Ю. Луценко, Д.К. Назарова, Д.М. Слободянюк // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 3. 2023. С. 43-51.
25. Ахлестин А.И. Реализация процессов создания 3D-анимаций для цифровых макетов изделий средствами Open CASCADE / А.И. Ахлестин, А.Н. Юров, М.И. Чижов // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 3. 2023. С. 52-56.
26. Елисеев А.В. Концепция обобщенных динамических состояний в оценке вынужденных движений механических колебательных систем / А.В. Елисеев, Н.К. Кузнецов, А.С. Миронов // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 3. 2023. С. 57-66.
27. Разработка регулятора уровня в компенсаторе давления первого контура АЭС / В.Л. Бурковский, И.А. Болдырев, У.А. Щеглова, А.С. Кожин, А.А. Голиков // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 3. 2023. С. 67-73.
28. Моделирование температурного режима привода из материала с эффектом памяти формы / В.Н. Зимин, Г.Н. Кувыркин, И.Ю. Савельева, А.О. Шахвердов // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 4. 2023. С. 7-15.
29. Веркнер А.С. Разработка алгоритмов управления мобильным роботом с компенсацией возмущения / А.С. Веркнер, К.О. Горлова, Е.О. Гурьянова // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 4. 2023. С. 16-24.
30. Петрухнова Г.В. Проектирование систем управления робототехническими системами посредством САД-системы / Г.В. Петрухнова, В.А. Трубецкой, А.С. Точилин // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 4. 2023. С. 25-31.
31. Супрунов И.И. Применение модели конвейерной обработки в задачах логистики / И.И. Супрунов // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 4. 2023. С. 32-36.
32. Дятчина А.В. Разработка проблемно-ориентированной системы для решения оптимизационной задачи управления потоком поступающих заявок / А.В. Дятчина, С.А. Олейникова, Т.Н. Недикова // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 4. 2023. С. 37-43.

33. Разработка прототипа программно-аппаратного комплекса синхронно-векторных измерений на базе GPS-синхронизированного аналого-цифрового преобразователя / В.А. Казбанов, М.С. Курицкий, А.Н. Алещенко, В.М. Анискевич // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 4. 2023. С. 44-54.

34. Слиденко А.М. Методы исследования колебаний инструмента ударного устройства при асимметричных нагрузках / А.М. Слиденко // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 4. 2023. С. 55-63.

35. Трубицын Д.Н. Функционал автоматизированной системы разработки и управления производством твердотельных реле / Д.Н. Трубицын, А.В. Коськин // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 4. 2023. С. 64-70.

36. Згода Ю.Н. Построение аппроксимационных функций для высокопроизводительного моделирования оболочек / Ю.Н. Згода // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 5. 2023. С. 8-15.

37. Волков И.Н. Алгоритмизация управления технологическими процессами производства асфальтобетонных смесей / И.Н. Волков, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 5. 2023. С. 16-22.

38. Олейникова С.А. Об одном подходе к решению задачи прогнозирования величины потребления электроэнергии с использованием методов машинного обучения / С.А. Олейникова, К.А. Бидененко, А.В. Малюгин // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 5. 2023. С. 23-30.

39. Каляшина А.В. Программная реализация управления движением мобильного робота с использованием QR-кода / А.В. Каляшина, Л.Ф. Фаткуллина // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 5. 2023. С. 31-38.

40. Юров А.Н. Анализ и разработка решений по захвату объектов из видеопотока без предварительного обучения алгоритма распознавания сущностей / А.Н. Юров, М.В. Паринов // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 6. 2023. С. 7-12.

41. Анализ графовых систем управления базами данных / Д.Р. Никольский, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, С.А. Коваленко, А.М. Нужный // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 6. 2023. С. 13-20.

42. Муконин А.К. Математическое моделирование частотного электропривода / А.К. Муконин, В.А. Трубецкой, Д.А. Тонн // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 6. 2023. С. 21-27.

43. Методика разработки интерактивного макета жилого здания / М.Ю. Сергеев, А.С. Багно, А.М. Нужный, Н.И. Гребенникова // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 6. 2023. С. 28-31.

44. Неизвестный О.Г. Программа имитационного моделирования системы предиктивного управления процессом дегидрирования этилбензола / О.Г. Неизвестный // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 6. 2023. С. 32-40.

45. Разработка структуры системы принятия решения при управлении БПЛА / В.А. Малиновкин, Н.В. Валуйских, В.Ф. Барабанов, М.Н. Аралов, А.В. Барабанов // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 6. 2023. С. 41-46.

46. Петрухнова Г.В. Тестовый контроль конечных автоматов / Г.В. Петрухнова, М.Г. Усачев, Е.В. Попова // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 6. 2023. С. 47-52.

47. Программная реализация задачи линейной оптимизации на базе муравьиного алгоритма / Д.А. Баранов, М.А. Белых, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, В.Н. Черников // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 6. 2023. С. 53-58.

48. Моделирование распределения температуры на термоэлементе при охлаждении ламинарным потоком / О.А. Дорохова, И.Л. Батаронов, Т.А. Надеина, Н.А. Ююкин // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 6. 2023. С. 59-68.

49. Обработка информации и подготовка набора данных для системы управления на основе детекции объектов с использованием машинного зрения / П.Ю. Гусев, В.В. Сокольников, В.В. Ветохин, А.А. Агеев // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 6. 2023. С. 69-75.

50. Сравнительный анализ современных алгоритмов сжатия данных без потерь в составе программных решений / М.С. Войтенко, А.С. Войтенко, В.В. Сафронов, В.Н. Черников, М.Н. Аралов // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 6. 2023. С. 76-80.

51. Купцов В.С. Математическая модель задачи обтекания сферы неньютоновским потоком несжимаемой жидкости при малых числах Рейнольдса / В.С. Купцов, А.А. Катрахова // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 6. 2023. С. 81-84.

References

1. Mishachev N.M., Shmyrin A.M., Shcherbakov A.P. Two schemes for hierarchical identification of quasilinear models // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 1, pp. 7-13.
2. Nikishin K.I. Coding methodology of control automats for traffic transmission in a software defined network // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 1, pp.14-19.
3. Mikhaylusov A.V. Using convolutional neural networks for diagnosing skin cancer // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 1, pp. 20-26.
4. Reznikov K.G., Podvalny S.L. Software development for rendering of polymerization processes // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 2, pp. 7-14.
5. Burkovskiy V.L., Volkov I.N. Problems of technological processes management in road construction // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 2, pp. 15-20.
6. Dudarev R.S., Chizhov M.I. Study of emergency operation of a steam turbine control system and its simulation based on Any Logic capabilities // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 2, pp. 21-26.
7. Likhotin M.A. Use of convolutional neural networks for prediction of brain tumors // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 2, pp. 27-32.
8. Oleinikova S.A., Dyatchina A.V. Development of special mathematical software for the system of control of the incoming applications flow // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 2, pp. 33-37.
9. Kireev I.S., Zubarev I.V., Burkovsky V.L. Mathematical modeling of long line operation based on representation as a chain with distributed parameters // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 2, pp. 38-44.
10. Bataronov I.L., Shunin G.E., Kostryukov S.A., Peshkov V.V. Simulation of electromechanical processes in a solid-state wave gyroscope with piezoelectric transducers // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 2, pp. 45-52.
11. Kuripta O.V., Vorob'eva Yu.A., Minakova O.V. Improving the environmental assessment of a real estate object by software engineering methods // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 2, pp. 53-60.
12. Burakova E.A. Decision support when managing the production of carbon nanotubes with specified settings // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 2, pp. 61-67.
13. Egorova K.V. Simulation model of flight control of a group of unmanned aerial vehicles based on the bee colony algorithm // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 2, pp. 68-71.
14. Sedykh I.A., Strugov I.V. Determination of the optimal set of variables using machine learning methods in the study of rating systems // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 2, pp. 72-78.
15. Sechenov P.A. Comparison of the speed of numerical methods of Gaussian and LUP decomposition in the problem of finding the equilibrium chemical composition // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 2, pp. 79-85.
16. Tung N.K. Algorithm for adaptive estimation of parameters for nonlinear nonstationary systems // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 2, pp. 86-93.

17. Nacharov D.V. Image contrast enhancement by means of modified S-shaped intensity transform // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 2, pp. 94-102.
18. Baranov D.A., Tupitsyna A.S., Barabanov V.F., Grebennikova N.I., Zolnikov K.V. Development of a system for recognizing customer service quality using artificial neural network technology // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 3, pp. 7-12.
19. Akhlestin A.I., Yurov A.N., Chizhov M.I. Development of scalable cross-platform QML applications with integration of the Open CASCADE geometric constructions module // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 3, pp. 13-16.
20. Shcherbakov A.P. Three-level hierarchical regression model of clinker production process // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 3, pp. 17-22.
21. Murzinov V.L., Murzinov Yu.V., Murzinov P.V., Kocherzhenko D.V. Contactless diagnostics of working automated process equipment // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 3, pp. 23-27.
22. Filatov K.Yu., Vorobyov V.V., Buluchevsky D.S., Barabanov V.F., Grebennikova N.I. The structure of the microclimate remote monitoring system based on cellular topology // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 3, pp. 28-35.
23. Shuai I., Maslovskaya A.G. Differential model of bacterial communication during the evolution of daughter colonies: finite element implementation // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 3, pp. 36-42.
24. Kalugin V.T., Kalugina M.D., Lutsenko A.Yu., Nazarova D.K., Slobodyanyuk D.M. Perforation of the stabilizing divergent «skirt» for improving aircraft aerodynamic characteristics // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 3, pp. 43-51.
25. Akhlestin A.I., Yurov A.N., Chizhov M.I. Implementation of 3D animation creation processes for digital product layouts by means of Open CASCADE // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 3, pp. 52-56.
26. Eliseev A.V., Kuznetsov N.K., Mironov A.S. The concept of generalized dynamic states in the evaluation of forced movements of mechanical oscillatory systems // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 3, pp. 57-66.
27. Burkovsky V.L., Boldyrev I.A., Shcheglova U.A., Kozhin A.S., Golikov A.A. Development of level regulator in the pressure compensator of the NPP first circuit // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 3, pp. 67-73.
28. Zimin V.N., Kuvyrkin G.N., Savelieva I.Yu., Shakhverdov A.O. Study of the temperature condition of an actuator made of a material with a shape memory effect // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 4, pp. 7-15.
29. Verkner A.S., Gorlova K.O., Guryanova E.O. Control algorithms development of mobile robot with perturbation compensation // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 4, pp. 16-24.
30. Petrukhnova G.V., Trubetskoy V.A., Tochilin A.S. Design of control systems for robotic systems by means of a CAD system // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 4, pp. 25-31.
31. Suprunov I.I. Application of conveyor processing model in logistics problems // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 4, pp. 32-36.
32. Dyatchina A.V., Oleinikova S.A., Nedikova T.N. Development of a problem-oriented system for solving optimization task of managing the flow incoming applications // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 4, pp. 37-43.

33. Kazbanov V.A., Kuritskiy M.S., Aleshchenko A.N., Aniskevich V.M. Developing a prototype of software-hardware system for synchrophasor measurements based on GPS-disciplined analog-to-digital converter // *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 4, pp. 44-54.
34. Slidenko A.M. Study of impact device tool oscillations under asymmetric loads // *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 4, pp. 55-63.
35. Trubitsyn D.N., Koskin A.V. Functionality of the automated system for the development and production control of solid-state relays // *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 4, pp. 64-70.
36. Zgoda Yu.N. Original approach to generation of approximation functions for high-performance shell structures simulation // *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 5, pp. 8-15.
37. Volkov I.N., Burkovsky V.L. Algorithmization of technological processes management of asphalt concrete mixtures production // *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 5, pp. 16-22.
38. Oleynikova S.A., Bidnenko K.A., Malyugin A.V. About one approach to solving the problem of forecasting the amount of electricity consumption using machine learning methods // *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 5, pp. 23-30.
39. Kalyashina A.V., Fatkullina L.F. Software implementation of mobile robot motion control using QR code // *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 5, pp. 31-38.
40. Yurov A.N., Parinov M.V. Analysis and development of solutions for capturing objects from video stream without pre-training of entity recognition algorithm // *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 7-12.
41. Nikolsky D. R., Barabanov V.F., Grebennikova N.I., Kovalenko S.A., Nuzhny A.M. Analysis of graph database management systems // *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 13-20.
42. Mukonin A.K., Trubetskoy V.A., Tonn D.A. Mathematical modeling of a frequency electric drive // *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 21-27.
43. Sergeev M. Yu., Bagno A.S., Nuzhny A.M., Grebennikova N.I. Methodology for developing the interactive layout of a residential building // *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 28-31.
44. Neizvestny O.G. Simulation program for predictive control of the ethylbenzene dehydrogenation process // *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 32-40.
45. Malinovkin V.A., Valuyskikh N.V., Barabanov V.F., Aralov M.N., Barabanov A.V. Analysis of the main functional capabilities of unmanned aerial vehicles // *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 41-46.
46. Petrukhnova G.V., Usachev M.G., Popova E.V. Test control processes of finite state machines // *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 47-52.
47. Baranov D.A., Belykh M.A., Barabanov V.F., Grebennikova N.I., Chernikov V.N. Software implementation of the linear optimization problem based on the ant algorithm // *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 53-58.
48. Dorokhova O.A., Bataronov I.L., Nadeina T.A., Yuyukin N.A. Simulation of temperature distribution on a thermoelectric element during laminar flow cooling // *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 59-68.
49. Gusev P.Yu., Sokolnikov V.V., Vetokhin V.V., Ageev A.A. Information processing and data set preparation for a control system based on object detection using machine vision // *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 69-75.

50. Voitenko M.S., Voitenko A.S., Safronov V.V., Chernikov V.N., Aralov M.N. Comparative analysis of modern lossless data compression algorithms as part of software solutions // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 6, pp. 76-80.

51. Kuptsov V.S., Katrakhova A.A. Mathematical model of the problem of a non-newtonian incompressible flow around sphere liquids at low Reynolds numbers // Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2023, vol. 19, no. 6, pp. 81-84.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, E-mail, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Подвальный Семен Леонидович	доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный технический университет, профессор кафедры автоматизированных и вычислительных систем, spodvalny@yandex.ru SPIN-код 4099-3480
Малюкова Светлана Анатольевна	Воронежский государственный технический университет, директор издательства, rio_svetlana@mail.ru

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Semyon Leonidovich Podvalny	Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University, Professor of the Department automated and computing systems, spodvalny@yandex.ru SPIN-code 4099-3480
Svetlana Anatolevna. Malyukova	Voronezh State Technical University, publishing director, rio_svetlana@mail.ru

the article was submitted 01.04.2024	approved after reviewing 12.04.2024	accepted for publication 23.04.2024
статья поступила в редакцию 01.04.2024	одобрена после рецензирования 12.04.2024	принята к публикации 23.04.2024

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ УСТРАНЕНИЯ ОТКАЗОВ И НЕИСПРАВНОСТЕЙ В УЧЕБНО-ТРЕНИРОВОЧНЫХ СРЕДСТВАХ

Владимир Витальевич Алексеев✉	1,2	vvalex1961@mail.ru
Михаил Алексеевич Свиридов	1	-
Никита Сергеевич Толстошеин	1	-
Виктор Васильевич Шатских	1	-

¹Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск РЭБ (учебный и испытательный), г. Тамбов, 392006, Россия

²Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106/5, Тамбов, 392000, Россия

Аннотация. Уровень развития современных УТС предназначенных для подготовки специалистов по эксплуатации и применению ССН достаточно высок. Хорошо развиты средства трехмерного моделирования в том числе создания виртуальной и дополненной реальности, с помощью которых обстановка, в которой функционирует ССН максимально приближается к реальной. В этих условиях существенно возрастает эффективность применения УТС при подготовке специалистов, применяющих ССН. Также развиты технологии формирования действий специалистов в штатных ситуациях. Основной трудностью, сдерживающей дальнейшее повышение эффективности применения УТС, является полное отсутствие технологий, предназначенных для тренировки действий в нештатных ситуациях. Раскрыты особенности моделирования таких технологий. Приведены примеры их реализации.

Ключевые слова. Учебно-тренировочные средства, нештатные ситуации, устранение отказов и неисправностей.

Для цитирования: Алексеев В. В., Свиридов М. А., Толстошеин Н. С., Шатских В. В. Особенности моделирования технологии устранения отказов и неисправностей в учебно-тренировочных средствах // Инженерные технологии. 2024. № 2 (6). С. 64-70.

Original article

FEATURES OF SIMULATION OF TECHNOLOGY FOR ELIMINATING FAILURES AND MALFUNCTIONS IN TRAINING FACILITIES

Vladimir V. Alekseev✉	1,2	vvalex1961@mail.ru
Mihail A. Sviridov	1	-
Nikita S. Tolstoshein	1	-
Viktor V. Shatskih	1	-

¹Interspecific Center for Training and Combat Use of Electronic Warfare Troops (training and testing), Tambov, 392006, Russia

²Tambov State Technical University, Sovetskaya str., 106/5, Tambov, 392000, Russia

Abstract. The level of development of modern educational and training facilities intended for training specialists in the operation and application of special-purpose systems is quite high. Three-dimensional modeling tools are well developed, including the creation of virtual and augmented reality, with the help of which the environment in which special-purpose systems operate is as close to real as possible. Under these conditions, the effectiveness of the use of educational and training means in the training of specialists using special-purpose systems increases significantly. Technologies for shaping the actions of specialists in normal situations have also been developed. The main difficulty hindering further increases in the effectiveness of the use of educational and training tools is the complete lack of technologies designed to train actions in emergency situations. The features of modeling such technologies are revealed. Examples of their implementation are given.

Keywords. Educational and training tools, emergency situations, elimination of failures and malfunctions.

For citation: Alekseev V. V., Sviridov M. A., Tolstoshein N. S., Shatskih V. V. Features of simulation of technology for eliminating failures and malfunctions in training facilities. *Ingenernye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (2 (6)): 64-70. (In Russ.).

Введение

Современные учебно-тренировочные средства (УТС) успешно применяются для

подготовки специалистов систем специального назначения (ССН). Учебно-тренировочные средства экономят ресурс ССН, дают возможность одновременной подготовки большого

количества специалистов, позволяют смоделировать работу ССН в штатных и нештатных ситуациях при различных условиях, в том числе при отказах и неисправностях элементов ССН. В сравнении с УТС прошлых поколений, разработанных на основе электромеханических устройств, современные УТС опираются на программное обеспечение с использованием имитационных моделей, благодаря мощным ЭВМ. Это делает современные УТС более доступными и многофункциональными [1].

Также активно развивается направление создания УТС с использованием технологий трехмерного моделирования виртуальной и дополненной реальности [2-4]. Разработанные, с применением этих технологий, УТС отличаются относительной свободой действий внутри тренажера, обеспечением обратной связи от тренажера к обучаемому и обстановкой, в которой функционирует ССН, максимально приближенной к реальной [5].

Созданием УТС занимаются различные организации. Наиболее успешными являются CAE (25 %), Thales (15 %), FSI (15 %), L-3 Link (11 %) (указан процент от общего количества разработанных средств). Россия отстает от этих компаний, имея всего 2 %, но уверенно наращивает темпы производства [6].

Эффективное управление системами специального назначения (ССН) требует от специалиста, не только базовых знаний и навыков, но и более углубленных, которые приходят только с многолетним опытом. Опытный специалист имеет способность к узнаванию и адекватному анализу факторов риска, а также к быстрому принятию правильного решения в различных нештатных ситуациях. На данный момент такой опыт можно приобрести только при работе в полевых условиях на реальной технике, в критической ситуации. Смоделировать аварийную ситуацию и провести подготовку специалистов для отработки действий при отказах и неисправностях элементов ССН с использованием УТС значительно проще, чем с реальными ССН.

Таким образом, целью исследования, результаты которого приведены в данной статье являлось выявление особенностей построения моделей, обеспечивающих формирование профессионально важных компетенций по устранению отказов и неисправностей, возникающих в нештатных ситуациях при применении ССН по назначению.

Особенности моделирования технологии устранения отказов и неисправностей

Для предотвращения ошибок при использовании ССН (в том числе при аварийных ситуациях) применяется имитационное моделирование, информационные технологии извлечения знаний и нечеткой логики. Будучи участником человеко-машинной системы, человек в системе обозначен как структурный элемент деятельности (СЭД), а ССН, как и УТС считается организационно-технической системой (ОТС). Наиболее точно в таких системах моделируется технологический объект. До настоящего времени человек в подобных моделях учитывался как оператор, который должен наблюдать состояние системы и вовремя произвести управляющее воздействие. Первым шагом к моделированию поведения самого человека в системе является создание средства, позволяющего перевести делегированные функции в практическую плоскость, учитывая доступный массив факторов в реальном времени, в том числе возможности самого человека и применяемых им средств управления [7].

При разработке УТС в него целесообразно заложить структуру для дальнейшего расширения функционала, создать систему симуляции виртуальной системы (систему взаимозависимых объектов), функционал для оперативной замены элементов «исследуемого» объекта [8]. Это позволит сделать УТС более гибким инструментом для подготовки. Также УТС целесообразно использовать как систему по сбору статистических данных об эффективности подготовки специалистов. УТС позволяет подготовить персонал к работе в любых ситуациях: от сложно воспроизводимых в обычных условиях до чрезвычайных, опасных для жизни и здоровья [9].

Важный шаг для создания режима тренировки специалистов к действиям в нештатных ситуациях с применением УТС – сбор статистики о возможных нештатных ситуациях для конкретных систем. Каждая система специального назначения по-своему уникальна и имеет свои особенности эксплуатации. Накопление статистики для каждой конкретной системы может осуществляться различными способами:

- опрос экспертов;
- сбор данных с ремонтных баз;
- получение информации у производителя и т.п.

Анализ применения ряда ССН, предназначенных для радиоэлектронной борьбы, показал, что нештатные ситуации при их применении связаны с:

- возгораниями;

- отказом или повреждением элементов ССН;
- неправильно заданными первичными настройками элементов системы;
- некорректной работой элементов системы (неисправностью).

Для каждой ситуации разрабатываются различные пути решения и формируется информационно-ситуационная карта (ИСК). Пример простейшей ИСК представлен на рисунке 1.

Сформировав базу ИСК, они включаются в случайном порядке в штатный норматив, тем самым делая разнообразнее прохождение одного и того же норматива. В связи с этим специалисту постоянно приходится приспосабливаться к новой обстановке и подбирать оптимальное решение для новой нештатной ситуации.

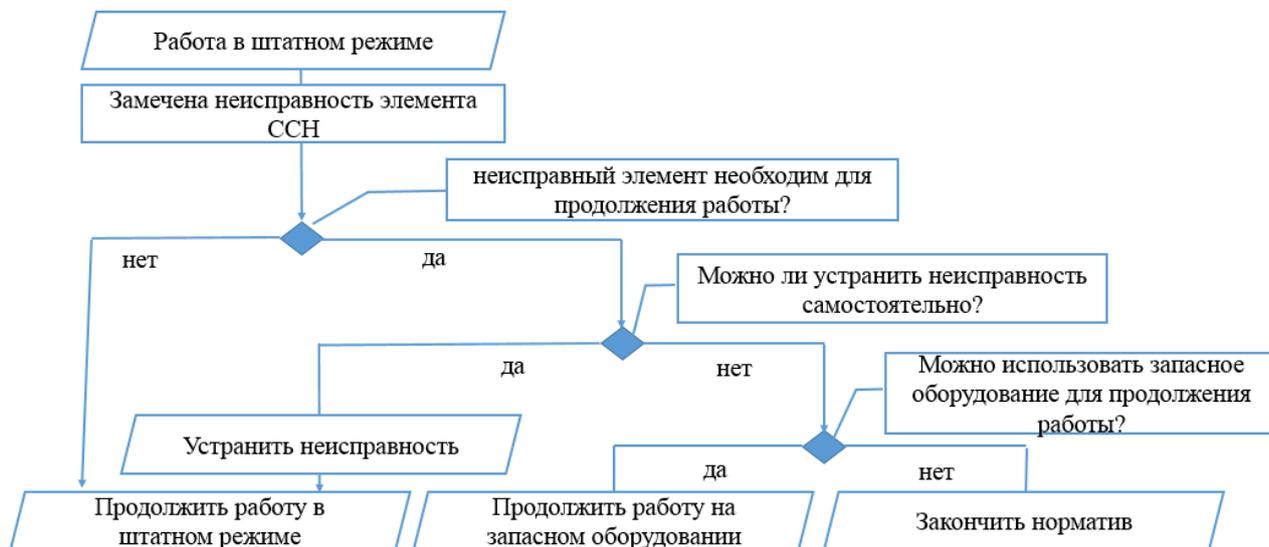


Рисунок 1. Фрагмент ИСК поломки элемента ССН

Figure 1. Fragment of the information and situational map of the breakdown of a special purpose equipment element

Подготовка специалиста к действиям при нештатных ситуациях начинается с изучения данных о возможных поломках и неисправностях и их ликвидации для конкретной

ССН. Данная информация включается в теоретический блок (рисунок 2) вместе с остальными теоретическими основами применения данной ССН.



Рисунок 2. Теоретический блок учебно-тренировочного средства

Figure 2. Theoretical block of the educational and training tool

В практическом блоке (рисунок 3) добавляется режим нештатных ситуаций, в котором специалист проходит один из стандартных нормативов для ССН, но со случайной нештатной ситуацией, возникающей в данной системе. Режим обеспечивает выполнение специалистом учебно-тренировочной задачи, состоящей из заданной цели и сценария, в содержание которого включаются события ин-

цидентов (отказ работы некоторого оборудования или элементов системы). Тренировка начинается с запуска стартового состояния системы. Специалист проходит норматив до момента возникновения нештатной ситуации. Ему необходимо определить нештатную ситуацию и совершить действия по исправлению этой ситуации для продолжения прохождения норматива.

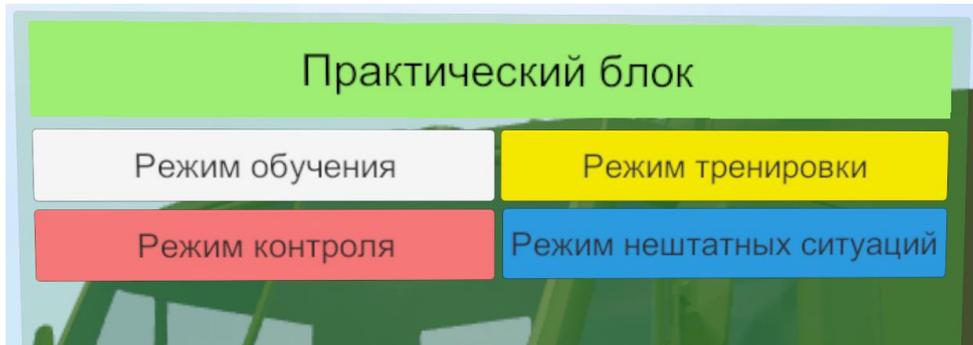


Рисунок 3. Практический блок учебно-тренировочного средства

Figure 3. Practical block of educational and training tool

Так, например, при прохождении норматива по подключению связи специалист вводит радиоданные в радиостанцию. Далее при помощи пульта управления соединяет ССН с другими системами. В процессе соединения на пульте управления появляется надпись с ошибкой (рисунок 4), обозначающая, что нет радиоданных.

ние норматива с корректировкой на другую радиостанцию.



Рисунок 4. Пульт управления с ошибкой настроек

Figure 4. Remote control with settings error

Причиной проблемы служит неисправная работа радиостанции. Неисправности могут быть как в самой радиостанции, так и с другими элементами системы. Внимательно осмотрев радиостанцию, специалист увидит на панели радиостанции подсвеченный элемент (рисунок 5), обозначающий аварию передатчика.

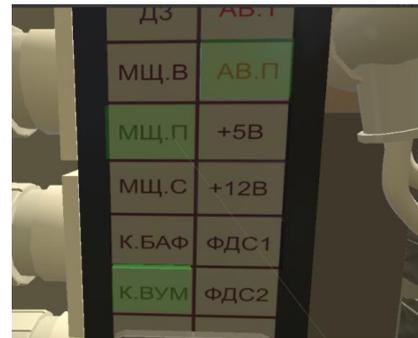


Рисунок 5. Панель радиостанции

Figure 5. Radio panel

Другой неисправностью радиостанции может являться отсутствие питания радиостанции из-за плохо закрепленного провода питания (рисунок 6).

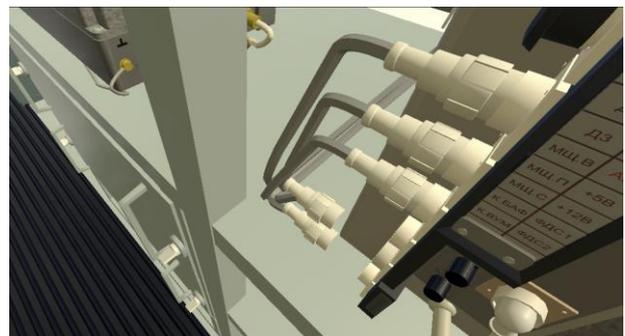


Рисунок 6. Отсоединенные провода питания

Figure 6. Disconnected power cords

Эту неисправность невозможно устранить в полевых условиях, поэтому специалисту необходимо ввести радиоданные в резервную радиостанцию, и продолжить выполне-

В данном случае специалисту достаточно подключить провода, заново ввести радиоданные и продолжить выполнение норматива. В итоговом отчете о пройденном нормативе выводится таблица, в которой указаны:

- общее время прохождения норматива;
- время отклика специалиста на внештатную ситуацию;

- количество лишних действий, совершенное в процессе решения внештатной ситуации;
- время решения нештатной ситуации.

Сбор статистики прохождения нормативов с конкретными нештатными ситуациями, позволил провести адекватную оценку времени прохождения и действий специалиста. В таблице 1 представлено время прохождения норматива в штатной и нештатной ситуации.

Таблица 1. Сравнение времени прохождения норматива

Table 1. Comparison of time to pass the standard

Номер специалиста / The specialist's number	Время прохождения норматива / The time of passing the standard	Первое прохождение норматива с нештатной ситуацией / The first passage of the standard with an emergency situation	Второе прохождение норматива с нештатной ситуацией / The second passage of the standard with an emergency situation	Уменьшение времени прохождения / Reducing the passage time
1	4 мин 35 с	7 мин 30 с	6 мин 40 с	50 с
2	4 мин 50 с	8 мин 10 с	7 мин 10 с	60 с
3	4 мин 45 с	9 мин 10 с	8 мин 30 с	40 с
4	4 мин 25 с	7 мин 20 с	6 мин 30 с	50 с
5	5 мин 10 с	9 мин 30 с	8 мин 20 с	1 мин 10 с
В среднем	4 мин 45 с	8 мин 20 с	7 мин 26 с	54 с

Время, за которое специалисты справились с нештатной ситуацией, сократилось почти на минуту. Это показывает эффективность разработки технологий тренировки специалистов к действиям в нештатной ситуации. В полевых условиях это может помочь избежать негативного исхода.

Выводы

Таким образом, знание особенностей технологии устранения отказов и неисправностей в системах специального назначения помогло выработать опыт построения адекватных моделей технологии формирования у спе-

циалистов навыков действий нештатных ситуациях для учебно-тренировочных средств, что положительно сказывается на общем уровне подготовленности специалистов и позволяет быстрее и адекватнее решать проблемы, возникающие при применении систем специального назначения. Представленные результаты исследования уже показали свою полезность при подготовке специалистов систем специального назначения при проведении СВО. Так, в среднем, эффективность применения систем специального назначения радиоэлектронной борьбы выросла на 10 %.

Литература

1. Лискин В. М. Разработка и производство учебно-тренировочных средств для боевых расчетов, эксплуатирующих вооружение и военную технику ПВО. М.: НО «Ассоциация «Лига содействия оборонным предприятиям», 2011. 504 с.
2. Образцов И. В., Белов В. В. Виртуальные тренажеры в практике технического образования [Электронный ресурс]. URL: <http://cdokp.tstu.tver.ru/site.services/download.aspx?act=1&did=89791&dbid=marcmain>.
3. Медведев В. И., Шишленин Д. А. Виртуальная реальность с новыми разработками – к новым рубежам // Вестник военного образования. 2021. №4 (31). С. 72-76.
4. Мусихин А. Г., Фримучков А. Н. Разработка симулятора для обучения студентов на военной кафедре // Academy. 2017. №6 (21). С. 16-18.
5. Анализ и классификация комплексов учебно-тренировочных средств / А. С. Абрамов, Л. Ю. Сафонов, Н. Е. Стариков, Ю. А. Чадаев // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. № 7. С. 95-102.

6. В. В. Белов, Д. А. Водиченков, Н. Н. Власов Анализ принципов и российского опыта построения учебно-тренировочных средств // Cloud of Science. 2016. Т. 3. № 1. С. 81-93.
7. Моделирование нештатных и аварийных ситуаций в современных тренажерах / С. Ю. Сальников, А. Н. Снежин, В. М. Простокишин, И. Я. Васкань // Вести газовой науки. 2017. № 1 (29). С. 41-48.
8. Вавилова Н. И. Проектирование виртуальных тренажеров. [Электронный ресурс]. URL: <https://ckto.narod.ru/stvirtrr.htm>.
9. Подход к моделированию нештатных ситуаций с использованием виртуального тренажера для обучения / Е. А. Мишенков, А. А. Малышев, А. В. Кулагин, Д. Ю. Сагун // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 99-110. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-08.

References

1. Liskin V. M. Development and production of training equipment for combat crews operating weapons and military air defense equipment. M.: SS "Association "League for Assistance to Defense Enterprises", 2011. pp. 504.
2. Obraztsov I.V., Belov V.V. Virtual simulators in the technical education practice [Electronic resource]. URL: <http://cdokp.tstu.tver.ru/site.services/download.aspx?act=1&did=89791&dbid=marcmain>.
3. Medvedev V.I., Shishlenin D.A. Virtual reality with new developments - to new frontiers // Bulletin of military education. 2021. No. 4 (31). pp. 72-76.
4. Musikhin A. G., Frimuchkov A. N. Development of a simulator for teaching students at the military department // Academy. 2017. No. 6 (21). pp. 16-18.
5. Analysis and classification of training complexes and facilities / A. S. Abramov, L. Yu. Safonov, N. E. Starikov, Yu. A. Chadaev // News of Tula State University. Technical science. 2022. No. 7. pp. 95-102.
6. V. V. Belov, D. A. Vodichenkov, N. N. Vlasov Principles of creation modern training facilities in the Russian Federation // Cloud of Science. 2016. Т. 3. No. 1. pp. 81-93.
7. Modeling off-nominal and emergency conditions in state-of-art training simulators / S. Yu. Salnikov, A. N. Snezhin, V. M. Prostokishin, I. Ya. Vaskan // News of gas science. 2017. No. 1 (29). pp. 41-48.
8. Vavilova N. I. Design of virtual simulators. [Electronic resource]. URL: <https://ckto.narod.ru/stvirtrr.htm>.
9. Approach to modeling non-standing situations using a virtual simulator to train personnel / E. A. Mishenkov, A. A. Malyshev, A. V. Kulagin, D. Yu. Sagun // Information and mathematical technologies in science and management. 2019. No. 4 (16). pp. 99-110. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-08.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, E-mail, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Алексеев Владимир Витальевич	д.т.н., профессор ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», yvalex1961@mail.ru SPIN-код 257342 ORCID 0000-0002-0398-4426 WoS L-5915-2018 Scopus 57193327405
Свиридов Михаил Алексеевич	Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск РЭБ
Толстошеин Никита Сергеевич	Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск РЭБ
Шацких Виктор Васильевич	Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск РЭБ

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (<i>academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors</i>)
Alekseev Vladimir Vitalyevich	Doctor of Technical Sciences, Professor, FSBEI of HE «Tambov State Technical University», yvalex1961@mail.ru SPIN-code 257342 ORCID 0000-0002-0398-4426 WoS L-5915-2018 Scopus 57193327405
Sviridov Mihail Alekseevich	Interspecific Center for training and combat use of electronic warfare troops
Tolstoshein Nikita Sergeevich	Interspecific Center for training and combat use of electronic warfare troops
Shatskih Viktor Vasil'evich	Interspecific Center for training and combat use of electronic warfare troops

the article was submitted 03.06.2024	approved after reviewing 17.06.2024	accepted for publication 27.06.2024
статья поступила в редакцию 03.06.2024	одобрена после рецензирования 17.06.2024	принята к публикации 27.06.2024

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Алексей Петрович Попов✉	1	aleksej_p_91@mail.ru
Антон Сергеевич Андрусенко	1	ndrsnk369@gmail.com
Дмитрий Сергеевич Кисель	1	dkisel350@mail.ru

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, проспект революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Статья посвящена описанию структуры, алгоритма работы, пользовательского интерфейса и функциональных возможностей информационной системы, разработанной для решения задач многопараметрической идентификации математических моделей технологических процессов и нахождения нелокальных экстремумов негладких функций. Разработан конструктор, позволяющий пользователю осуществлять ввод в информационную систему структуры математической модели в исходном виде с последующим её автоматическим преобразованием в конечно-разностную форму записи и распознаванием символьных элементов математических выражений для определения вектора оцениваемых параметров с вводом значений начальных приближений. Выполнена программная реализация усовершенствованного численного метода покоординатного спуска для решения задач идентификации параметров моделей технологических процессов. Создан программный сервис, предоставляющий возможность автоматизировать большую часть процедур, выполняемых пользователем при решении задач параметрической идентификации. С помощью разработанной информационной системы выполнены численные эксперименты по оценке параметров моделей кинетики химико-технологических процессов. Установлено, что реализованный в информационной системе усовершенствованный метод покоординатного спуска обеспечивает нахождение оптимальных значений совокупности параметров математической модели химического процесса вне зависимости от величин начальных приближений.

Ключевые слова: информационная система, математическая модель, идентификация, метод оптимизации, программный конструктор моделей.

Для цитирования: Попов А. П., Андрусенко А. С., Кисель Д. С. Информационная система многопараметрической идентификации моделей технологических процессов // Инженерные технологии. 2024. № 2 (6). С. 71-81.

Original article

INFORMATION SYSTEM FOR MULTI-PARAMETER IDENTIFICATION OF TECHNOLOGICAL PROCESS

Alexey P. Popov✉	1	aleksej_p_91@mail.ru
Anton S. Andrusenko	1	ndrsnk369@gmail.com
Dmitry S. Kisel	1	dkisel350@mail.ru

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia

Annotation. The paper is devoted to the description of the structure, operation algorithm, user interface and functionality of the information system developed for solving problems of multiparameter identification of mathematical models of technological processes and finding nonlocal extrema of nonsmooth functions. A software service has been created, which provides an opportunity to automate most of the procedures performed by the user when solving the problems of parametric identification. The program realization of the improved numerical method of coordinate descent for solving problems of identification of parameters of technological process models is carried out. The model builder allowing the user to input the structure of mathematical model in the initial form into the information system with its subsequent automatic transformation into finite-difference form of recording and recognition of symbolic elements of mathematical expressions to determine the vector of estimated parameters with input of initial approximation values has been developed. With the help of the developed information system numerical experiments on estimation of parameters of models of chemical-technological processes kinetics have been carried out. It is established that the improved method of coordinate descent realized in the information system provides finding the optimal values of the set of parameters of the mathematical model of the process regardless of the values of initial approximations.

Keywords: information system, mathematical model, identification, optimization method, software model builder.

For citation: Popov A. P., Andrusenko A. S., Kisel D. S. Information system for multi-parameter identification of technological process. *Ingenerye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (2 (6)): 71-81. (InRuss.).

Введение

В настоящее время перед предприятиями химической отрасли стоит задача, заключающаяся в модернизации своих производств. Это подразумевает внедрение новых цифровых технологий для повышения уровня автоматизации химико-технологических процессов (ХТП) в совокупности со снижением их ресурсо- и энергоёмкости.

Одним из способов усовершенствования автоматизированных систем управления ХТП является разработка математических моделей, адекватно описывающих физико-химические процессы, а также производительность и показатели качества готовой продукции. Данные модели должны пройти несколько стадий эволюции: от классических математических описаний к имитационным моделям, как технологических процессов, так и контуров автоматизированных систем управления; от имитационных моделей к компьютерным аналогам (эквивалентам) автоматизированных управляющих систем. Использование цифровых эквивалентов химико-технологических систем (ХТС) на действующих производствах позволяет в режиме реального времени осуществлять расчет прогнозных динамических траекторий, описывающих изменение параметров состояния ХТС.

Все это способствует осуществлению перехода химических предприятий к индустрии 4.0, а именно к использованию технологии цифровых двойников технологических линий химического синтеза. Концепция внедрения в производство цифровых двойников предполагает параллельное функционирование реального объекта управления и его компьютерного эквивалента, который на основе базы данных об эксплуатации технологического оборудования и технологической линии осуществляет оценку параметров технологического процесса с целью реализации оптимального управления.

Для синтеза цифрового двойника химико-технологических систем (ХТС) и их автоматизированных управляющих комплексов в первую очередь необходимо разработать и/или усовершенствовать ранее созданные математические модели теплообменных, массообменных и химических процессов, протекающих в разных агрегатных состояниях [1-2]. Эти модели, как правило, представляют собой системы дифференциальных (в том числе в частных производных), интегральных и интегродифференциальных уравнений. Они содержат в своей структуре большое количество как эм-

пирических коэффициентов, так и реальных физических параметров, значения которых неизвестны или требуется их уточнение. Поэтому, алгоритмическое обеспечение разрабатываемого цифрового двойника должно включать в себя такие инструменты как эффективные численные методы поисковой оптимизации, способные определять нелокальные экстремумы целевой функции для решения задач идентификации параметров ХТС и оценки оптимальных значений управляющих воздействий.

В настоящее время существует большое количество различных методов поисковой оптимизации [3-6]. Однако, их применение в качестве подсистемы алгоритмического обеспечения цифрового двойника, выполняющей оценку параметров ХТП в реальном времени с учетом наличия ограничений на значения искомых параметров, не позволяет получить приемлемое по точности и устойчивое решение. Это связано с высокой размерностью решаемых задач, нелинейностью и сложностью имитационных моделей ХТП, а также отсутствием возможности получения нелокального экстремума если целевая функция не является гладкой.

Постановка задачи

Для решения задач идентификации параметров моделей ХТП, в научной работе [7] предложен усовершенствованный метод покоординатного спуска, который использовался для оценки кинетических параметров процесса термоокислительной деструкции полимеров в растворе. Однако, до настоящего времени, не был создан универсальный программный инструмент, позволяющий широкому кругу пользователей применять предложенный алгоритм поиска для решения задач многопараметрической идентификации моделей ХТП. Таким образом, разработка информационной системы как программного инструмента, реализующего на ЭВМ, описанную в [7] модификацию метода покоординатного спуска, и, предоставляющего возможность осуществлять первоначальный ввод модели в исходном виде без навыков программирования, является актуальной научно-практической задачей.

Принимая во внимание масштаб и сложность поставленной задачи, целесообразно использовать метод декомпозиции, заключающийся в решении ограниченного набора более простых взаимосвязанных задач.

Таким образом, разработка программно-обеспечения включает в себя следующие стадии:

1. Разработка алгоритма поиска оптимальных

значений вектора параметров моделей, имеющего высокую размерность.

2. Программная реализация численного метода нелокальной оптимизации.
3. Разработка и программная реализация конструктора математических моделей, позволяющего пользователю, не владеющему навыками программирования, осуществлять ввод структуры математической модели с указанием оцениваемых параметров.
4. Разработка и программная реализация алгоритма, предоставляющего возможность осуществлять загрузку экспериментальных данных для идентификации параметров моделей.
5. Создание пользовательского интерфейса информационной системы, позволяющего осуществлять анализ изменения целевой функции и вывод результатов идентификации.

Интерфейс программного обеспечения содержит следующие инструменты, используя которые пользователь осуществляет:

1. Ввод (генерацию) исходного вида математической модели для ее последующей обработки и преобразования в машинный код, исполняемый данной информационной системой.
2. Загрузку экспериментальных данных.
3. Выбор начальных приближений вектора параметров модели и условий завершения процесса поиска.
4. Организация стратегии поиска параметров модели.
5. Анализ и сохранение полученных результатов.

Функциональные возможности и описание программного обеспечения

Программное обеспечение «Информационная система для решения задач параметрической идентификации моделей технологических процессов» является информационным сервисом, осуществляющим поиск параметров математических моделей. Функционал программного обеспечения предоставляет возможность пользователю производить идентификацию параметров математических моделей ХТП по критерию минимума средней относительной погрешности между экспериментальными и рассчитанными по модели значениями. Информационная система разработана с использованием языка программирования С# [8].

Программное обеспечение позволяет автоматизировать следующие процессы:

1. Преобразование введенной пользователем математической модели в подходящую для обработки программным кодом информа-

ционной системы польскую обратную запись [9];

2. Приведение уравнений модели к конечно-разностному виду [10, 11].
3. Организация работы с экспериментальными данными в процессе выполнения алгоритма идентификации.
4. Реализация работы алгоритма, выполняющего поиск оптимальных параметров математической модели [7].
5. Сохранение найденных значений параметров в специально созданные информационной системой ячейки памяти.
6. Обеспечение работы графического модуля во время проведения пользователем анализа полученных результатов.

Информационная система не требует длительного обучения для использования своего функционала. Ее интерфейс и панель управления способствуют быстрому ознакомлению и освоению пользователем последовательности операций, которые необходимо выполнить для получения конечного результата.

Программный продукт представляет собой информационную систему с графическим интерфейсом, предназначенную для использования как частными лицами в научно-исследовательских целях, так и на предприятиях, на которых возникает потребность параметрической идентификации математических моделей технологических процессов и автоматизированных систем управления с целью повышения их эффективности, улучшения качества продукции, снижения издержек и сокращения времени производства.

Алгоритм функционирования программного обеспечения

Алгоритм работы программного обеспечения представляет собой набор методов, реализующих математические или логические операции, а также взаимодействие с пользователем через графический интерфейс:

1. Запуск пользователем программного обеспечения.
2. Ввод модели технологического процесса.
3. Преобразование введенной модели в список математических выражений в постфиксной нотации.
4. Преобразование определенных алгоритмом парсера математических выражений, лежащих в основе введенной модели к конечно-разностному виду.
5. Определение пользователем параметров, которые будут оптимизированы в процессе работы программы и ввод начальных

приближений.

6. Ввод исходных данных для оптимизации.
7. Загрузка экспериментальных данных из файла.
8. Оптимизация указанных пользователем на шаге 4 параметров путем использования усовершенствованного метода по координатного спуска.
9. Вывод результатов оптимизации параметров модели (окно «Результаты оптимизации»).
10. Завершение работы программы.

Укрупненная блок-схема работы информационной системы показана на рисунке 1.



Рисунок 1. Укрупненная блок-схема алгоритма работы пользователя с информационной системой

Figure 1. An enlarged block diagram of the user's algorithm for working with an information system

Интерфейс программного обеспечения

Графический интерфейс информационной системы состоит из двух основных экранных форм: стартовой формы «Информационная система многопараметрической идентификации моделей технологических процессов» и формы «Результаты идентификации».

После запуска информационной системы на экране появляется стартовое окно (рисунок 2). В верхнем левом углу экранной формы находится группа элементов «Конструктор модели», которая включает в себя поле «Количество уравнений в модели» и поле для ввода математической модели.

Справа от «Конструктора модели» находится группа панелей, созданных для упрощения процесса ввода модели пользователем. Данная группа представляет собой набор панелей: «Стандартные операторы», «Тригонометрические функции», «Дифференциальные уравнения» и «Интегральные уравнения». С помощью кнопок, находящихся на данных панелях, пользователь добавляет соответствующую функцию или оператор в текущее положение курсора.

В нижнем левом углу стартовой формы находится панель «Параметры модели и начальные приближения». После обработки введенной пользователем модели, на данной панели отображается перечень распознанных информационной системой параметров, подлежащих оценке, и поля для ввода пользователем значений их начальных приближений.

Справа от панели «Параметры модели и начальные приближения» находится панель «Исходные данные для идентификации», где расположены три поля, которые необходимо заполнить пользователю для начала работы. Первое поле – «Заданная величина средней относительной погрешности, %». Второе поле – «Количество итераций до переключения при условии, что значение целевой функции изменится на величину, не превышающую некоторое заданное малое значение». Третье поле – «Коэффициент для расчета величины шага по искомому параметру», величина которого может принимать численные значения в интервале от нуля до единицы. Ниже этих трех полей находится поле «Количество оцениваемых параметров модели».

На панели «Загрузка экспериментальных данных» располагаются четыре кнопки и поле для проверки результата загрузки данных из файла. При нажатии на кнопку «Загрузить

данные», открывается окно выбора. После выбора файла экспериментальные данные загружаются в систему. Также на данной панели содержится кнопка «Очистка», очищающая поле для проверки загруженных из файла данных, кнопка «Определить параметры модели», при нажатии на которую алгоритм синтаксического анализатора (парсера) преобразует введенную модель, и кнопка «Старт», после нажатия на которую происходит запуск алгоритма

численного метода оптимизации в случае, если все исходные данные были введены корректно. На рисунке 2 в качестве примера приведены результаты выполнения процедур, предшествующих стадии идентификации параметров:

- формирование структуры математической модели,
- ввод экспериментальных данных;
- определение искомым параметров с указанием их начальных приближений.

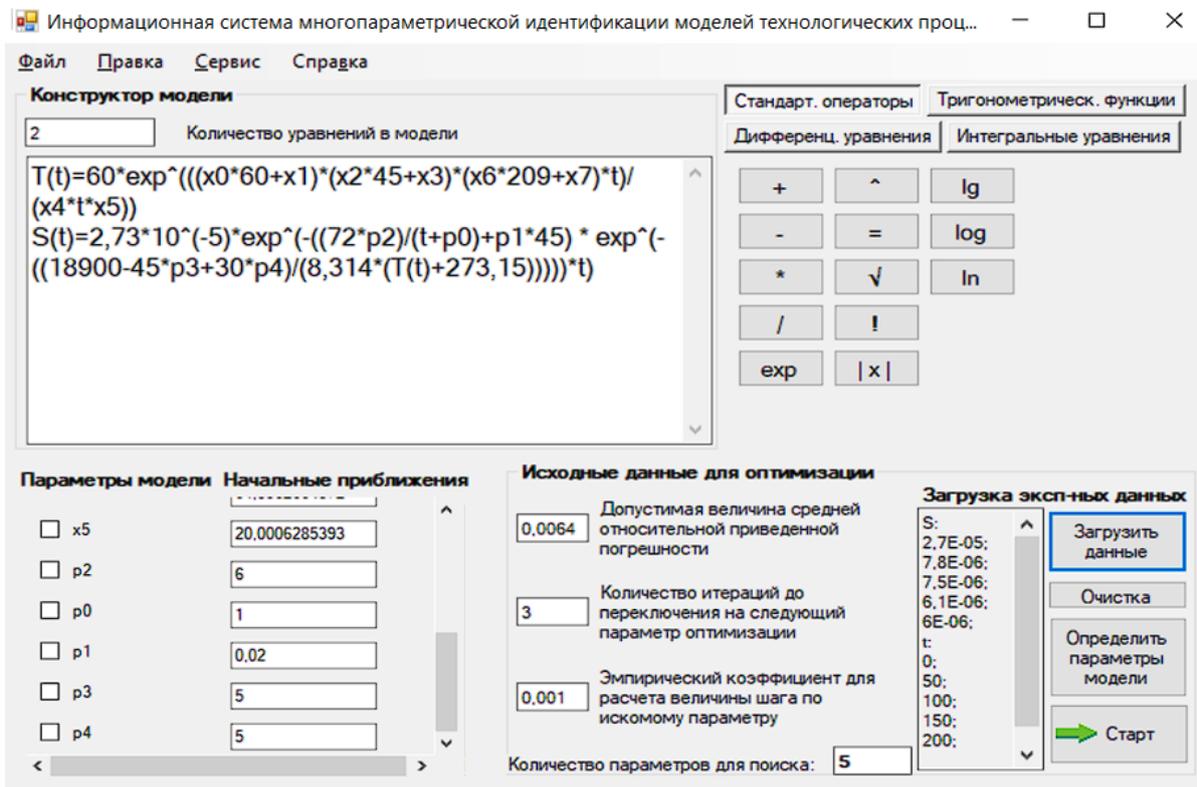


Рисунок 2. Стартовая форма информационной системы

Figure 2. The starting form of the information system

Также на стартовой экранной форме расположено стандартное для Windows меню с выпадающими списками. Оно состоит из вкладок «Файл» (рисунок 3), «Правка» (рисунок 4), «Сервис» (рисунок 5) и «Справка» (рисунок 6).

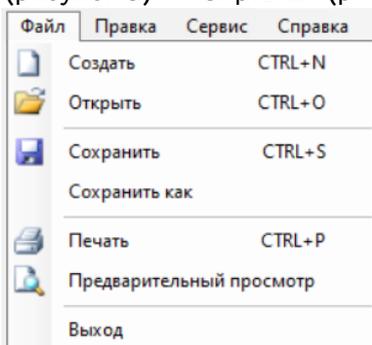


Рисунок 3. Вкладка «Файл»

Figure 3. The «File» tab

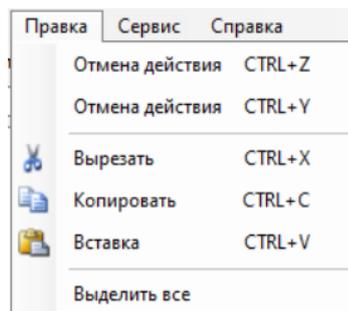


Рисунок 4. Вкладка «Правка»

Figure 4. The «Edit» tab

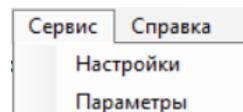


Рисунок 5. Вкладка «Сервис»

Figure 5. The «Service» tab

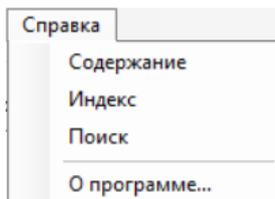


Рисунок 6. Вкладка «Справка»

Figure 6. The «Help» tab

После завершения работы основного алгоритма на экран выводится второе окно «Результаты идентификации» (рисунок 7). В левой

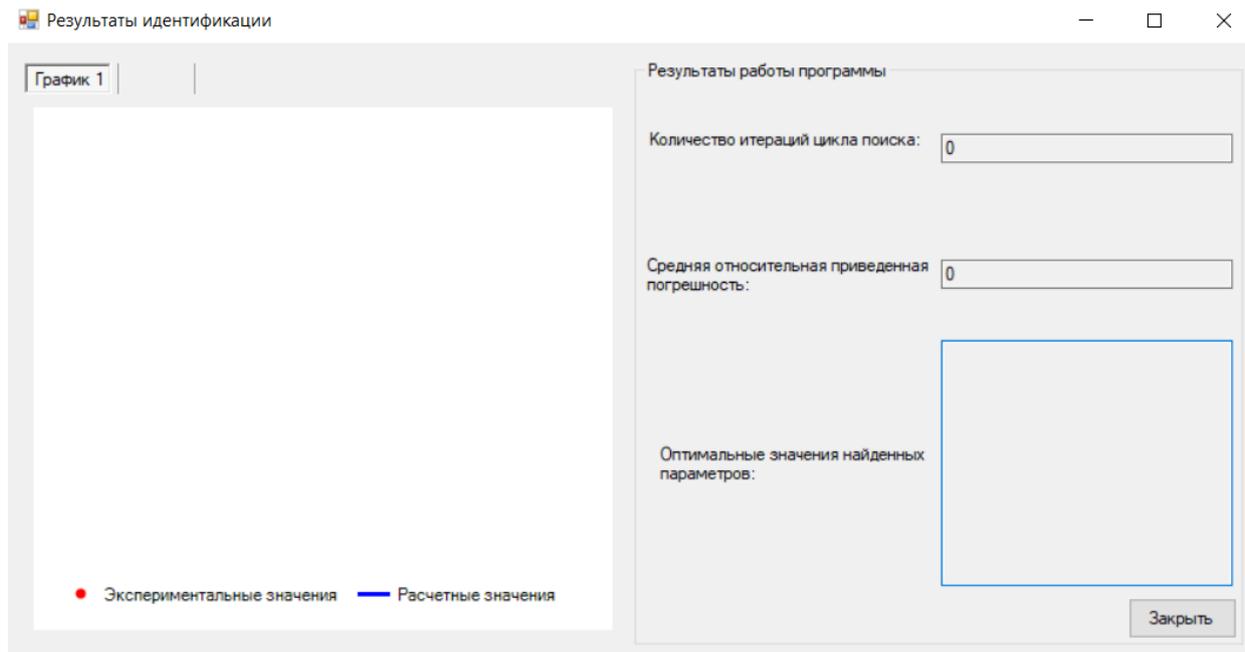
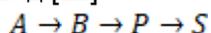


Рисунок 7. Экранная форма «Результаты идентификации»

Figure 7. On-screen form «Identification results»

Решение задачи идентификации параметров математической модели химической кинетики

В рамках данной исследовательской работы, с использованием функционала разработанной информационной системы, проведен вычислительный эксперимент по идентификации параметров математической модели процесса химических превращений, кинетическая схема которого имеет вид [11]:



Математическая модель, описывающая данный механизм выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} v \cdot \frac{dCa}{dt} = -k_1 \cdot Ca \\ v \cdot \frac{dCb}{dt} = k_1 \cdot Ca - k_2 \cdot Cb \\ v \cdot \frac{dCp}{dt} = k_2 \cdot Cb - k_3 \cdot Cp \\ v \cdot \frac{dCs}{dt} = k_3 \cdot Cp \end{cases} \quad (1)$$

части этой экранной формы находится группа панелей, содержащая графики зависимостей рассчитанных по модели данных и экспериментальных значений. В правой части экранной формы находятся три поля, недоступных для редактирования пользователю, и кнопка. Первое поле – «Количество итераций цикла оптимизации». Второе поле – «Средняя относительная погрешность» и третье поле – «Значения найденных параметров модели». В нижней правой части находится кнопка «Закреть».

Средняя относительная погрешность рассчитанных по модели значений концентраций вещества от экспериментальных данных вычисляется по формуле:

$$KRITER = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \left(\frac{Cp_i^{ras} - Cp_i^{exp}}{Cp_i^{exp}} \right)_{k_0, k_1, k_2} \rightarrow min$$

Проведена серия экспериментов по поиску значений k_1, k_2, k_3 при различных значениях начальных приближений, указанных в таблице 1. В этой же таблице приведены результаты идентификации в виде полученных комбинаций значений искомых величин: k_1', k_2', k_3' соответственно. Исходя из проведенного анализа полученных результатов, можно сделать вывод, что реализованный в информационной системе усовершенствованный метод покоординатного спуска обеспечивает нахождение нелокального экстремума функции независимо от используемых стартовых значений поиска.

Таблица 1. Результаты работы информационной системы

Table 1. Results of the information system operation

№ эксперимента / Experiment number	Начальные приближения / Initial approximations			Результаты идентификации / Identification results				№ итерации цикла поиска / Iteration number of the search cycle
	k_1	k_2	k_3	k_1'	k_2'	k_3'	KRITER	
1	5	5	5	4,71	1,01	3,08	0,818	1 275
2	30	1	17	4,73	1,01	3,07	0,818	28 950
3	0,5	100	10	4,74	1,01	3,08	0,818	1 541 613
4	100	0,1	20	4,71	1,01	3,07	0,818	625 432
5	2	30	3	4,73	1,01	3,07	0,818	54 414
6	1	1	1	4,74	1,01	3,07	0,818	61 371
7	0,05	0,15	10	4,72	1,01	3,07	0,818	147 504

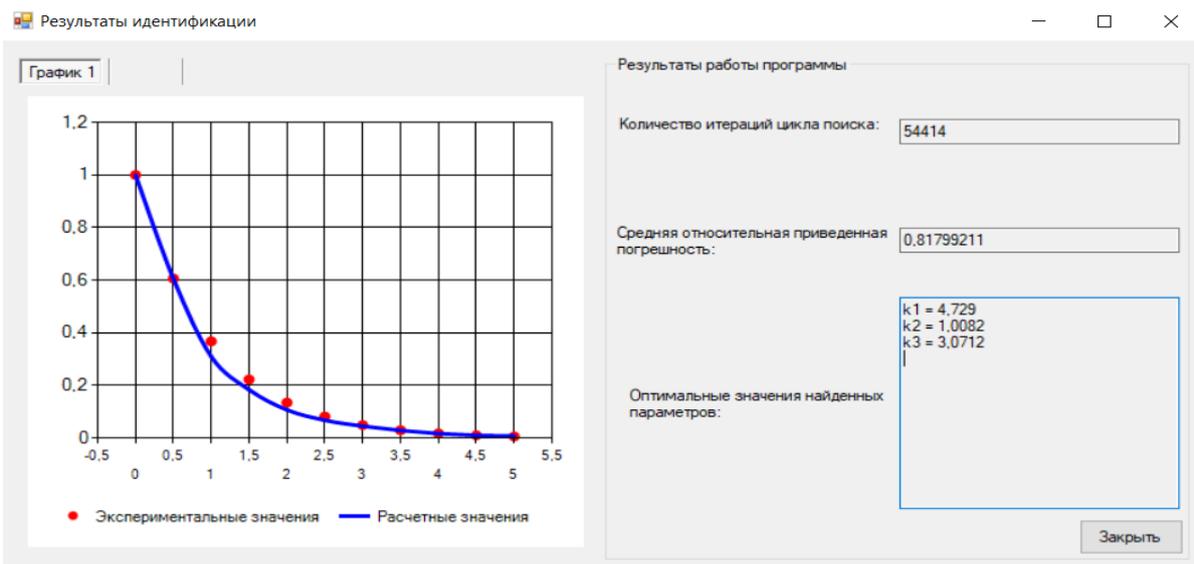


Рисунок 8. Результаты идентификации параметров модели

Figure 8. Results of identification of model parameters

Решение задачи идентификации параметров модели процесса разрушения поперечных связей при термомеханической деструкции резинотехнического изделия

Второй вычислительный эксперимент, проведенный с использованием разработанной информационной системы, посвящен оценке оптимальных параметров модели, описывающей динамику процесса термомеханической обработки резинотехнического изделия (РТИ) [10]. Модель включает в себя уравнение изменения температуры РТИ под воздействием сдвиговых напряжений и уравнение, позволяющее осуществлять расчет концентрации поперечных связей в полимерной матрице РТИ по мере изменения температуры. Система уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} T(t) = 60 * e^{\frac{(x_0+60+x_1)*(x_2+45+x_3)+(x_4+209+x_7)+t}{x_4+t*x_5}} & (2) \\ S(t) = 2,73 * 10^{-5} * e^{-\left[\frac{72+p_2}{t+p_0}+p_1\right]*e^{-\left[\frac{18900-45+p_3+30*p_4}{8,314*[T(t)+273,5]}\right]}} \end{cases}$$

где $x_0 = -0,0011728454$; $x_1 = 0,1328806005$; $x_2 = -0,5508182822$; $x_3 = -31,549386779$; $x_4 = 64,0362664872$; $x_5 = 20,0006285393$; $x_6 = 0,0035639219$; $x_7 = -12,2717171926$;

p_0, p_1, p_2, p_3, p_4 – эмпирические коэффициенты; i – порядковый номер итерации цикла идентификации.

Средняя относительная погрешность рассчитанных по модели значений концентраций поперечных связей от экспериментальных данных вычисляется по формуле:

$$KRITER = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i^{ras} - S_i^{exp}}{S_i^{exp}} \right)^{p_0, p_1, p_2, p_3, p_4} \rightarrow min$$

В данной модели оцениваемыми параметрами являются величины p_0, p_1, p_2, p_3, p_4 . Процесс поиска их оптимальных значений, реализуемый в разработанной информационной системе, представлен на скриншотах экранных форм консоли разработчика (рисунки 9 и 10).

Z:	S	dS	dX	p0	p1	p2	p3	p4
0:	0,2046020	0,0000000	0,0000000	1,0000000	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
1:	0,2043878	-0,0002143	-0,0010000	0,9990000	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
2:	0,2041736	-0,0002142	-0,0010002	0,9979998	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
3:	0,2039594	-0,0002141	-0,0010004	0,9969994	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
4:	0,2037454	-0,0002141	-0,0010006	0,9959987	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
5:	0,2035314	-0,0002140	-0,0010009	0,9949979	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
6:	0,2033175	-0,0002139	-0,0010011	0,9939968	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
7:	0,2031036	-0,0002139	-0,0010013	0,9929955	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
8:	0,2028898	-0,0002138	-0,0010015	0,9919940	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
9:	0,2026761	-0,0002137	-0,0010017	0,9909923	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
10:	0,2024625	-0,0002137	-0,0010019	0,9899904	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
11:	0,2022489	-0,0002136	-0,0010021	0,9889882	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
12:	0,2020354	-0,0002135	-0,0010024	0,9879859	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
13:	0,2018219	-0,0002135	-0,0010026	0,9869833	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
14:	0,2016085	-0,0002134	-0,0010028	0,9859805	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
15:	0,2013952	-0,0002133	-0,0010030	0,9849775	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
16:	0,2011820	-0,0002133	-0,0010032	0,9839743	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
17:	0,2009688	-0,0002132	-0,0010034	0,9829709	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
18:	0,2007557	-0,0002131	-0,0010036	0,9819672	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000
19:	0,2005426	-0,0002130	-0,0010039	0,9809634	0,0200000	6,0000000	5,0000000	5,0000000

Рисунок 9. Вывод расчетных значений параметров в консоль разработчика во время процесса идентификации

Figure 9. Output of calculated parameter values to the developer console during the identification process

5429:	0,0069980	-0,0000001	0,0001055	0,0719246	0,1096944	5,5813520	3,5245450	-4,1307280
5430:	0,0069980	0,0000000	0,0001055	0,0719246	0,1097999	5,5813520	3,5245450	-4,1307280
5431:	0,0069980	0,0000000	0,0001055	0,0719246	0,1096944	5,5813520	3,5245450	-4,1307280
5432:	0,0069980	0,0000000	0,0001055	0,0719246	0,1097999	5,5813520	3,5245450	-4,1307280
5433:	0,0069548	-0,0000433	-0,0055814	0,0719246	0,1097999	5,5757707	3,5245450	-4,1307280
5434:	0,0069202	-0,0000346	-0,0055816	0,0719246	0,1097999	5,5701891	3,5245450	-4,1307280
5435:	0,0068943	-0,0000259	-0,0055818	0,0719246	0,1097999	5,5646073	3,5245450	-4,1307280
5436:	0,0068771	-0,0000172	-0,0055819	0,0719246	0,1097999	5,5590254	3,5245450	-4,1307280
5437:	0,0068687	-0,0000084	-0,0055820	0,0719246	0,1097999	5,5534433	3,5245450	-4,1307280
5438:	0,0068691	0,0000004	-0,0055821	0,0719246	0,1097999	5,5478613	3,5245450	-4,1307280
5439:	0,0068687	-0,0000004	0,0055821	0,0719246	0,1097999	5,5534433	3,5245450	-4,1307280
5440:	0,0068771	0,0000084	0,0055821	0,0719246	0,1097999	5,5590254	3,5245450	-4,1307280
5441:	0,0068697	-0,0000074	-0,0035245	0,0719246	0,1097999	5,5478613	3,5210204	-4,1307280
5442:	0,0068703	0,0000006	-0,0035246	0,0719246	0,1097999	5,5478613	3,5174958	-4,1307280
5443:	0,0068697	-0,0000006	0,0035246	0,0719246	0,1097999	5,5478613	3,5210204	-4,1307280
5444:	0,0068701	0,0000005	0,0041307	0,0719246	0,1097999	5,5478613	3,5210204	-4,1265973
5445:	0,0068697	-0,0000005	0,0041307	0,0719246	0,1097999	5,5478613	3,5210204	-4,1307280
5446:	0,0068701	0,0000005	0,0041307	0,0719246	0,1097999	5,5478613	3,5210204	-4,1265973
5447:	0,0068702	0,0000001	-0,0000719	0,0718527	0,1097999	5,5478613	3,5210204	-4,1265973
5448:	0,0068767	0,0000065	-0,0001098	0,0719246	0,1096901	5,5478613	3,5210204	-4,1265973
5449:	0,0068701	-0,0000065	0,0001098	0,0719246	0,1097999	5,5478613	3,5210204	-4,1265973
5450:	0,0068638	-0,0000064	0,0001098	0,0719246	0,1099097	5,5478613	3,5210204	-4,1265973

Рисунок 10. Вывод расчетных значений параметров в консоль разработчика во время отладки (продолжение)

Figure 10. Output of calculated parameter values to the developer console during debugging (continued)

Результаты идентификации параметров модели (2) представлены на скриншоте экранной формы «Результаты идентификации» (рисунок 11).

Сравнительный анализ экспериментальных и рассчитанных с помощью найденных параметров p_0 - p_4 значений концентраций поперечных связей показал, что погрешность не

превышает 0,6%.

Таким образом, можно утверждать, что созданная информационная система позволяет решать задачи нахождения нелокальных оптимумов нелинейных целевых функций при решении задач идентификации параметров моделей химико-технологических процессов.



Рисунок 11. Результаты работы информационной системы

Figure 11. Results of the information system operation

Заключение

В результате решения поставленной научно-практической задачи, создано специализированное программное обеспечение «Информационная система многопараметрической идентификации моделей технологических процессов», являющееся удобным инструментом для идентификации параметров математических моделей. Предло-

женный программный комплекс может быть использован как для проведения научных исследований в области моделирования процессов и систем, так и в качестве средства оценки оптимальных значений параметров технологических процессов и настроек регулирующих устройств в производственных условиях.

Литература

1. Исследование изменения состава этилбензольной шихты в реакторе производства стирола с учетом парциальных давлений реагентов/ Подвальный С.Л., Попов А.П., Тихомиров С.Г., Карманова О.В., Неизвестный О.Г., Ковалева Е.Н. // Теоретические основы химической технологии. 2020. Т. 54. № 6. С. 775-783.
2. Системный анализ и синтез предиктивной системы управления процессом термоокислительной деструкции полимера в реакторе периодического действия/ Попов А.П., Тихомиров С.Г., Хаустов И.А., Хвостов А.А., Тихомиров Г.С. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2020. № 1. С. 36-50.
3. Захарова, Е.М. Обзор методов многомерной оптимизации / Е.М. Захарова, И.К. Минашина // Информационные процессы. – М.: Московский физико-технический институт, 2014. – Т. 14, № 3. – С. 256–274.
4. Бояринов, А.И. Методы оптимизации в химической технологии/ А.И. Бояринов, В.В. Кафаров. – М.: Наука., 1969. – 564 с.
5. Жигнявский, А.А. Методы поиска глобального экстремума/ А.А. Жигнявский, А.Г. Жилинскас. – М.: Наука., 1991. – 248 с.
6. Частикова, В.А. Генетические алгоритмы и генетическое программирование: особенности реализации/ В.А. Частикова и др.// Перспективы науки. 2019. № 1 (112). С. 13-16.
7. Системный анализ, моделирование и управление периодическим процессом термоокислительной деструкции полимеров в растворе / Попов А.П. диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Воронежский государственный университет инженерных технологий. Воронеж, 2015.
8. Прайс Марк. С# 10 и .NET 6. Современная кросс-платформенная разработка. — СПб.: Питер, 2023. — 848 с.
9. Хэмблин, Чарльз Леонард. Перевод в польскую нотацию и с нее / Компьютерный журнал. 2022. 5 (3). С. 210-213. doi:10.1093/comjnl/5.3.210.
10. Управление качеством в процессах растворной полимеризации / Битюков В.К., Лебедев В.Ф., Тихомиров С.Г., Хвостов А.А., Хаустов И.А. Воронеж, 2008.

11. Использование численных методов в решении задач АСУТП (теория и практика) [Текст] : учеб. пособие / В. К. Битюков, С. Г. Тихомиров, Е. А. Хромых [и др.]; Воронеж. гос. технол. акад. – Воронеж : ВГТА, 2008. – 251 с.

12. Оптимальное управление процессом получения бутилрегенерата на основе методов нечеткой оптимизации/ Карманов А.В. диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Воронежский государственный университет инженерных технологий. Воронеж, 2022.

References

1. Investigation of changes in the composition of the ethylbenzene charge in the styrene production reactor, taking into account the partial pressures of the reagents/ Podvalny S.L., Popov A.P., Tikhomirov S.G., Karmanova O.V., Neizvestny O.G., Kovaleva E.N. // *Theoretical foundations of chemical technology*. 2020. Vol. 54. No. 6. pp. 775-783.

2. System analysis and synthesis of a predictive control system for the process of thermal oxidative destruction of a polymer in a periodic reactor actions/ Popov A.P., Tikhomirov S.G., Khaustov I.A., Khvostov A.A., Tikhomirov G.S. // *Bulletin of the Voronezh State University. Series: System analysis and Information Technology*. 2020. No. 1. pp. 36-50.

3. Zakharova, E.M. Review of methods of multidimensional optimization / E.M. Zakharova, I.K. Mina-shina // *Information processes*. – M.: Moscow Institute of Physics and Technology, 2014. – Vol. 14, No. 3. – pp. 256-274.

4. Boyarinov, A.I. Optimization methods in chemical technology/ A.I. Boyarinov, V.V. Kafarov. – M.: Nauka, 1969. – 564 p.

5. Zhignyavsky, A.A. Methods of searching for a global extremum/ A.A. Zhignyavsky, A.G. Zhilinskis. – M.: Nauka, 1991. – 248 p.

6. Chastikova, V.A. Genetic algorithms and genetic programming: features of implementation/ V.A. Chastikova et al.// *Prospects of science*. 2019. No. 1 (112). pp. 13-16.

7. System analysis, modeling and control of the periodic process of thermal oxidative decomposition of polymers in solution / Popov A.P. dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Voronezh State University of Engineering Technologies. Voronezh, 2015.

8. Price Mark. C# 10 and .NET 6. Modern cross-platform development. – St. Petersburg: St. Petersburg, 2023. – 848 p.

9. Hamblin, Charles Leonard. Translation into and from Polish notation / *Computer Journal* 2022. 5 (3). C. 210-213. doi:10.1093/comjnl/5.3.210.

10. Quality management in the processes of solution polymerization / Bitjukov V.K., Lebedev V.F., Tikhomirov S.G., Khvostov A.A., Khaustov I.A. Voronezh, 2008.

11. The use of numerical methods in solving automated control system problems (theory and practice) [Text]: textbook. the manual / V. K. Bitjukov, S. G. Tikhomirov, E. A. Khromykh [et al.]; Voronezh State Technical University. acad. Voronezh : VGTA, 2008. – 251 p.

12. Optimal control of the process of obtaining butyl regenerate based on fuzzy optimization methods/ Karmanov A.V. dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Voronezh State University of Engineering Technologies. Voronezh, 2022.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Попов Алексей Петрович	кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», кафедра «Информационных и управляющих систем», aleksej_p_91@mail.ru SPIN-код 9276-3394 ORCID 0000-0002-1875-0868
Андрусенко Антон Сергеевич	бакалавр, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», кафедра «Управление в технических системах», ndrsnk369@gmail.com
Кисель Дмитрий Сергеевич	бакалавр, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», кафедра «Управление в технических системах», dkisel350@mail.ru

Authors information

Lastname, first name, patronymic	Information (<i>academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors</i>)
Popov Alexey Petrovich	PhD, Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, Department of Information and Control Systems, aleksej_p_91@mail.ru SPIN-code 9276-3394 ORCID 0000-0002-1875-0868
Andrusenko Anton Sergeevich	bachelor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Engineering Technologies», ndrsnk369@gmail.com
Kisel Dmitry Sergeevich	bachelor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Engineering Technologies», dkisel350@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30.05.2024	Одобрена после рецензирования 14.06.2024	Принята к публикации 28.06.2024
the article was submitted 30.05.2024	Approved after reviewing 14.06.2024	Accepted for publication 28.06.2024

Научная статья

УДК 004.942

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СНИЖЕНИЯ РИСКА ТРАВМАТИЗМА ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА

Александр Сергеевич Суровцев

alexander.surovtsev.vrn@gmail.com

Воронежский государственный университет инженерных технологий, проспект Революции, д. 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация: рассмотрена проблема так называемого «человеческого фактора» в эргатических системах. Для повышения надежности эргатических систем предложена интеллектуальная информационная система (ИИС). ИИС наблюдает как за изменением состояния технологического процесса, так и за изменением функционального состояния человека-оператора и выбирает режим управления технологическим процессом при его переводе из работоспособного в исправное состояние. Для снижения риска травматизма человека-оператора ИИС отстраняет человека-оператора от работы, если он в течении некоторого времени находится в нетрудоспособном состоянии.

Ключевые слова: надежность эргатических систем, эффективность трудовой деятельности человека-оператора.

Для цитирования: Суровцев А. С. Интеллектуальная информационная система для повышения надежности эргатических систем и снижения риска травматизма человека-оператора // Инженерные технологии. 2024 №2 (6). С. 82–86.

Original article

INTELLIGENT INFORMATION SYSTEM INCREASING THE RELIABILITY OF ERGATIC SYSTEMS AND REDUCING THE RISK OF INJURY TO A HUMAN OPERATOR

Alecsandr S. Surovtsev

alexander.surovtsev.vrn@gmail.com

Abstract: the problem of so-called “human factor” in ergatic systems is considered. An intelligent information system (IIS) is proposed to improve the reliability of ergatic systems. The IIS monitors both the changes in the state of the technological process and the changes in the functional state of the human-operator and selects the control mode of technological process when it is transferred from a workable to serviceable state. IIS suspends the human operator from work it he is unable to work for some time to reduce the risk of his injury.

Keywords: reliability of ergatic systems, human operator labor efficiency.

For citations: Surovtsev A. S. Intelligent information system increasing the reliability of ergatic systems and reducing the risk of injury to a human operator. Ingenerye tehnologii = Engineering technologies. 2024; (2 (6)): 82–86 (InRuss.).

Введение

Одним из назначений человек-оператора в эргатической системе является оказание управляющих воздействий на технологический процесс с целью повышения его надежности. Под надежностью в технике понимают свойство объекта сохранять свое состояние во времени. Межгосударственный стандарт «надежность в технике» определяет множество состояний объекта исследования (например, исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное, опасное и др.).

Если рассматривать переход технологического процесса из предотказного в опасное или предельное состояние, то надежность такого перехода можно интерпретировать как

противоаварийную безопасность промышленного производства, то есть способность не переходить в состояние, в котором риск аварии превышает установленный в документации технологического процесса порог. Однако, множество современных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) осуществляют перевод технологического процесса из предотказного в состояние нормального функционирования (работоспособное, но не предотказное) строго в автоматическом режиме, то есть без участия человека-оператора в управлении технологическим процессом. Из предотказного состояния технологический процесс может перейти одно из трех состояний:

- 1) работоспособное, но не предотказное состояние (технологический процесс продолжает свою работу без необходимости проведения технического обслуживания);
- 2) неработоспособное состояние по результатам, например, аварийной остановки технологического процесса (в этом состоянии технологический процесс не способен выполнять хотя бы одну из обязательных функций, а восстановление его работоспособности требует проведения его технического обслуживания);
- 3) предельное (или опасное состояние) (риск возникновения аварии превышает допустимый порог).

Перевод технологического процесса из предотказного в состояние нормального функционирования в автоматическом режиме исключает так называемый «человеческий фактор» из возможных причин аварии. АСУ ТП при возникновении предотказного состояния должна работать по следующему алгоритму: воздействовать на технологический процесс для перевода его в состояние нормального функционирования до некоторого уровня риска аварии, после чего выполнять аварийную остановку технологического процесса. Для реализации этого алгоритма АСУ ТП должна содержать элементы, которые его реализуют и обладают достаточным уровнем надежности (с точки зрения вероятности реализации алгоритма при возникновении предотказного состояния).

Технологический процесс в ходе выполнения своей работы может перейти из исправного в работоспособное состояние. В исправном состоянии все параметры технологического процесса соответствуют всем требованиям. В работоспособном состоянии значения параметров технологического процесса, которые характеризуют его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям технической документации. Исправное состояние является работоспособным, но в работоспособном состоянии значение одного или ряда определяющих параметров технологического процесса выходят за пределы номинального диапазона значений. Например, при переходе технологического процесса из исправного в работоспособное состояние могут снижаться некоторые количественные или качественные характеристики готовой продукции. Технологический процесс в рассматриваемых состояниях (исправном и работоспособном) может управляться как в автоматическом режиме, так и в автоматизированном (с участием человека-оператора). В автоматизированном режиме

есть риск того, что эффективность трудовой деятельности человека-оператора будет недостаточна для управления технологическим процессом в конкретной ситуации. Эффективность трудовой деятельности человека-оператора – его свойство, которое отражает его способность принимать неправильные решения при управлении технологическим процессом и время на принятие этих решений. Очевидно, что эффективность трудовой деятельности человека-оператора изменяется в процессе его трудовой деятельности, например, из-за утомления. Более того, разные операторы-технологи не обязательно будут иметь одинаковую эффективность трудовой деятельности даже при выполнении одинаковой работы.

Для оценки эффективности трудовой деятельности человека-оператора необходимо построить модель, которая учитывает индивидуальные психофизиологические особенности человека-оператора и его функциональное состояние во время выполнения работы. Использование данной модели позволит проводить непрерывное наблюдение за изменением оценки эффективности трудовой деятельности человека-оператора. Имитационное моделирование процесса перевода технологического процесса из работоспособного в исправное состояние позволит выявить наиболее оптимальный сценарий для оптимизации технологического процесса с целью повышения его надежности. Кроме этого, непрерывное наблюдение за изменением оценки эффективности трудовой деятельности человека-оператора позволит АСУ ТП определить моменты времени, когда значение его трудовой деятельности в течении определенной длительности находится ниже некоторого установленного уровня. Если эффективность трудовой деятельности человека-оператора находится ниже некоторого установленного уровня, АСУ ТП требуется принять меры для человека-оператора от работы с целью снижения риска его травматизма.

В связи с вышесказанным, целью данной работы является построение интеллектуальной информационной системы, которая выполняет непрерывное наблюдение за изменением эффективности трудовой деятельности человека-оператора с целью повышения надежности эргатических систем и снижения риска его травматизма.

Материалы и методы исследования

По результатам проведенного системного анализа интеллектуальной информационной системы (ИИС), которая определяет режим управления технологическим процессом,

определен набор задач, необходимый для реализации этой системы:

- 1) разработка специального программного обеспечения для автоматизированной обработки биомедицинских сигналов с целью построения психофизиологического портрета человека-оператора;
- 2) построение способа оценки функционального состояния человека-оператора по сигналам его вариабельности сердечного ритма;
- 3) прогноз вариабельности сердечного ритма человека-оператора;
- 4) модель для оценки эффективности трудовой деятельности человека-оператора от его функционального состояния и состояния технологического процесса;
- 5) алгоритм выбора режима управления технологическим процессом, который учитывает функциональное состояние человека-оператора и состояние технологического процесса.

Результаты исследования и обсуждение

Специальное программное обеспечение для автоматизированной обработки биомедицинских сигналов с целью построения психофизиологического портрета человека-оператора разработано при выполнении работы [1]. Это программное обеспечение позволяет выполнять проектирование методов оценки функционального состояния человека-оператора. Данное программное обеспечение содержит набор модулей для проведения поисковых исследований ряда биомедицинских сигналов, таких как вариабельность сердечного ритма (ВСР), электроэнцефалограмма (ЭЭГ) и т.д.

В работе [2] приведена номинальная шкала функциональных состояний человека-оператора. Эта шкала представлена следующими элементами:

- 1) работа человека-оператора при выполнении функциональной нагрузки «управление технологическим процессом, находящимся в исправном состоянии» на тренажере;
- 2) работа человека-оператора при выполнении функциональной нагрузки «управление технологическим процессом, находящимся в работоспособном состоянии» на тренажере;
- 3) работа человека-оператора при выполнении функциональной нагрузки «управление технологическим процессом, находящимся в исправном состоянии» в реальных условиях труда;

- 4) нетрудоспособное состояние человека-оператора. Для всех, кроме нетрудоспособного функционального состояния человека-оператора, строится его психофизиологический портрет. Психофизиологический портрет содержит информацию о его индивидуальных психофизиологических особенностях.

Функциональное состояние человека-оператора определено как вектор из спектральных и статистических характеристик ВСР. Психофизиологический портрет – область в гиперпространстве, которая включает облако точек функциональных состояний, вычисленных при выполнении человеком-оператором соответствующей функциональной нагрузки.

В работе [3] проведена параметрическая идентификация модели прогнозирования ВСР. При проведении исследований использовалась база записей сигналов ВСР 50 человек. Для каждого человека в базе содержится по 1 записи ВСР длительностью от 70 до 150 тысяч кардиоинтервалов. Из каждой записи выделялось три выборки – обучающая, кросс-валидационная и тестовая. Использовались три класса моделей прогнозирования временных рядов – линейная-регрессионная, многослойный перцептрон и LSTM-нейросеть. По результатам данной работы определено: 1) при 10 тысячах эпохах обучения моделей нет необходимости проводить кросс-валидацию; 2) для получения медианы MAPE прогнозов не превышающим 4% обучающая выборка должна содержать как минимум 700 кардиоинтервалов для всех моделей; 3) нейросеть с LSTM-нейронами снижает точности прогнозирования при наличии в обучающей выборке не более 10% ложноположительных или не более 9% ложноотрицательных результатов детектирования сердечных ударов.

Работа [4] содержит модель, которая позволяет оценить интервал времени, необходимый для перевода технологического процесса из работоспособного в исправное состояние. Интервал времени предложено рассматривать как сумму трех слагаемых:

- 1) времени отклика измерительного прибора;
- 2) латентного времени действий человека-оператора; задержки исполнительного механизма системы ручного управления.

Для латентного расчета латентного времени действий человека-оператора приведена формула, которая построена с использованием закона скорости обработки информации биологическими системами «сила-длительность».

Также в данной работе приведен алгоритм выбора режима перевода технологического процесса из работоспособного в исправное состояние. Данный алгоритм выбирает автоматический режим перевода, если человек-оператор находится в нетрудоспособном состоянии или интервал необходимого времени (сумма времени отклика измерительного прибора, латентного времени действий человека-оператора и задержки исполнительного механизма системы ручного управления) не превышает доступный на перевод интервал времени.

По результатам выполнения работы построена интеллектуальная информационная система (ИИС) управления эргатическими системами. Данная система выполняет непрерывное наблюдение за изменением функционального состояния человека-оператора. Если человек-оператора определенный промежуток времени находится в нетрудоспособном состоянии, ИИС отстраняет человека-оператора от выполнения работы для снижения риска его травматизма. Также данная ИИС проводит наблюдение за изменением состояния технологического процесса и выбирает режим управления им по результатам оценки возможности перевода технологического процесса в исправное состояние в автоматизированном режиме. Проведенное имитационное моделирование позволило установить увеличение надежности эргатической системы на 5% с 83% до 88%.

Выводы

В данной работе проведен анализ так называемого «человеческого фактора» в техно-

логических процессах. Рассмотрены случаи, когда технологический процесс необходимо переводить:

- 1) из предотказного состояния в состояние нормального функционирования;
- 2) из работоспособного в исправное.

В работе рассматривается построение интеллектуальной информационной системы, которая выбирает режим управления технологическим процессом при его переводе из работоспособного в исправное состояние для повышения надежности эргатической системы. Задача перевода технологического процесса из предотказного состояния в состояние нормального функционирования не решается, так как множество технологических процессов при таком переводе управляются только в автоматическом режиме, что исключает «человеческий фактор» из причин рисков возникновения аварий. Синтезированная ИИС проводит непрерывное наблюдение за изменением функционального состояния человека-оператора. Выполняет отстранение человека-оператора от работы, если он некоторый промежуток времени находится в нетрудоспособном состоянии, для снижения риска его травматизма. Данная ИИС также может быть использована при выборе кандидатов на должность человека-оператора посредством оценки надежности эргатической системы при управлении её различными людьми. При апробации предложенной интеллектуальной информационной системы определено повышение надежности при её использовании.

Литература

1. Туровский, Я. А. Программный пакет для автоматизированной обработки биомедицинских сигналов для поисковых исследований / Я. А. Туровский, А. С. Суровцев // Программная инженерия. – 2018. – № 8 (9). – С. 361-368.
2. Turovsky, Y. Monitoring the state of the operator of the ergatic system in uav control tasks / Y. Turovsky, A. Surovtsev, V. Alekseev, L. Rybak // Machines. – 2024. – №12. – С. 1-17.
3. Туровский, Я. А. Прогнозирование функционального состояния человека-оператора для повышения надежности эргатических систем / Я. А. Туровский, А. С. Суровцев // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023). – 2023. – № 1. – С. 1577-1581.
4. Авцинов И. А. Модель для оценки латентного времени действий оператора при стабилизации технологического процесса / И. А. Авцинов, А. С. Суровцев, Я. А. Туровский // Вестник тамбовского государственного технического университета. – 2018. – № 4(24). – С. 578-590.

References

1. Turovsky, Ya. A. Software package for automatic data processing of biomedical signals for exploratory researches / Ya. A. Turovsky, A. S. Surovtsev // Program engineering. – 2018. – № 8 (9). – P. 361-368.
2. Turovsky, Y. Monitoring the state of the operator of the ergatic system in uav control tasks / Y. Turovsky, A. Surovtsev, V. Alekseev, L. Rybak // Machines. – 2024. – №12. – P. 1-17.

3. Turovsky, Ya. A. Forecasting the functional state of a human operator to improve the reliability of ergatic systems / Ya. A. Turovsky, A. S. Surovtsev // *Management of large-scale system development (MLSD'2023)*. – 2023. – № 1. – P. 1577-1581.

4. Avtsinov I. A. The model for the estimating the latent time of operator actions for the process stabilization / I. A. Avtsinov, A. S. Surovtsev, Ya. A. Turovsky // *Bulletin of the Tambov State Technical University*. – 2018. – № 4(24). – P. 578-590.

Сведения об авторах

<i>ФИО</i>	<i>Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)</i>
Суровцев Александр Сергеевич	аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», кафедра «Информационных и управляющих систем», alexander.surovtse.vrn@gmail.com SPIN-код 5103-4630 ORCID 0009-0008-2086-3352

Authors information

<i>Last name, first name, patronymic</i>	<i>Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)</i>
Surovtsev Alexander Sergeevich	Postgraduate student, Voronezh state university of engineering technologies, Department of Information and Control Systems, alexander.surovtse.vrn@gmail.com SPIN-code 5103-4630 ORCID 0009-0008-2086-3352

Статья поступила в редакцию 04.06.2024	Одобрена после рецензирования 14.06.2024	Принята к публикации 27.06.2024
the article was submitted 04.06.2024	Approved after reviewing 14.06.2024	Accepted for publication 27.06.2024

MODERN RESEARCH & PATENTS ON GRAPHENE

Oleg Figovsky

figovsky@gmail.com

President Israel Innovation Authority, Jerusalem Technology Park, Derech Agudat Sport Ha'poel 2, Jerusalem, 9695102, Israel

Abstract. In recent years, more than 1000 articles have been published describing many uses and methods of working with graphene. This article describes some properties of graphene, several methods of use and some application options based on its unique features.

Keywords: graphene, 3D graphene, cost-effective.

For citation: Figovsky O. Modern Research & Patents on Graphene. *Ingenernye tehnologii = Engineering technologies.* 2024; (2 (6)): 87-92. (In Russ.).

Обзорная статья

СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПАТЕНТЫ НА ГРАФЕН

Олег Львович Фиговский

figovsky@gmail.com

Президент Израильской Ассоциации Изобретателей, Иерусалимский технологический парк, Дерех Агудат Спорт Хапоэль 2, Иерусалим, 9695102, Израиль

Аннотация. За последние годы было опубликовано более 1000 статей, описывающих множество применений и методов работы с графеном. В этой статье описаны некоторые свойства графена, несколько способов использования и некоторые варианты применения, основанные на его уникальных особенностях.

Ключевые слова: графен, 3D-графен, рентабельность.

Для цитирования: Фиговский О. Л. Современные исследования и патенты на графен // *Инженерные технологии.* 2024. № 2 (6). С. 87-92.

Introduction

Graphene is a single layer (monolayer) of carbon atoms, tightly bound in a hexagonal honeycomb lattice. It is an allotrope of carbon in the form of a plane of sp²-bonded atoms with a molecular bond length of 0.142 nanometres. Layers of graphene stacked on top of each other form graphite, with an interplanar spacing of 0.335 nanometres.

The separate layers of graphene in graphite are held together by van der Waals forces, which can be overcome during exfoliation of graphene from graphite. Graphene is the thinnest compound known to man at one atom thick, the lightest material known (with 1 square meter weighing around 0.77 milligrams), the strongest compound discovered (between 100-300 times stronger than steel with a tensile strength of 130 GPa and a Young's modulus of 1 TPa - 150,000,000 psi), the best conductor of heat at room temperature (at $(4.84 \pm 0.44) \times 10^3$ to $(5.30 \pm 0.48) \times 10^3$ W•m⁻¹•K⁻¹) and also the best conductor of electricity known (studies have shown electron mobility at values of more than 200,000 cm²•V⁻¹•s⁻¹).

A thin flake of ordinary carbon, just one atom thick, lies behind the 2010 Nobel Prize in Physics. Andre Geim and Konstantin Novoselov have shown that carbon in such a flat form has exceptional properties that originate from the remarkable world of quantum physics (1).

More than 1000 patents on graphene were applied in word for last years. I would like to describe below new patents on this field.

HYBRID GRAPHENE NANOPATELETS AND GLASS FIBERS POLYMER COMPOSITES - WO2024038416 (A1). Provided is a polymer composite reinforced with graphene nanoplatelets and glass fibers, which may be prepared by injection molding. Molecular interactions between the graphene nanoplatelets and the glass fibers result in improved mechanical performance in the polymer composite. Synergistic effects are observed when the concentration of the glass fibers is over 20% and the concentration of the graphene nanoplatelets is between about 0.25% and about 1%.

CORE-SHELL GRAPHENE-CONTAINING MICROCAPSULES AND

METHOD OF MAKING - WO2024038403 (A1).

The present disclosure provides methods of forming graphene-containing microcapsules (200), which may include steps of providing a graphene-containing precursor (204), combining the graphene-containing precursor (204) with a drying oil (202) such that the drying oil (202) is intercalated within the graphene-containing precursor (204) to form a graphene-containing aggregate, adding the graphene-containing aggregate to an aqueous solution comprising an emulsifier, and adding an encapsulating agent to form graphene-containing microcapsules (200). The graphene-containing microcapsules (200) of the present disclosure may be used in numerous applications including in self-healing materials.

GRAPHENE VARACTOR INCLUDING FERROELECTRIC MATERIAL - US11908901 (B1). A varactor may include a gate electrode; a graphene layer; and a ferroelectric layer between the gate electrode and the graphene layer.

CARBON-BASED CONDUCTING INKS - AU2022338190 (A1). The invention provides electrically conductive films containing graphene nanoplatelets packed in a substantially Apollonian manner. The films may also comprise carbon nanotubes in order to improve their conductivity. The invention also provides liquid compositions that can be used to print the electrically conductive films described herein.

ENERGETIC FORMULATIONS CONTAINING EPOXY-MODIFIED GRAPHENE OXIDE - AU2022322000 (A1). An energetic formulation includes graphene oxide functionalized with a molecule containing at least one epoxy group. The graphene oxide may include at least one functional group containing nitrogen between a graphene sheet and the at least one epoxy group. The epoxy group may be sourced from a hydrocarbon compound containing a plurality of epoxy groups. The functionalized graphene oxide may be coated onto ammonium perchlorate. The functionalized graphene oxide is used as a stand-alone energetic material in powder form, mixed as powder in a liquid fuel, or mixed as a powder in a solid fuel.

METHODS OF GRAPHENE PRODUCTION & COMPOSITIONS THEREOF - AU2022315240 (A1). Provided herein compositions of activated graphene oxide (AGO) and activated reduced graphene oxide (ARGO) and methods of producing thereof. The AGO and ARGO provided herein exhibit high surface areas and conductivities, and the methods herein enable facile production at large scale.

BUILD MATERIALS HAVING A POWDER MIXTURE COMPRISING GRAPHENE,

METHODS OF PRODUCING ARTICLES THEREFROM, AND ARTICLES PRODUCED THEREWITH - US2024058862 (A1). Methods and build materials are provided for producing articles with additive manufacturing processes. The methods comprise providing a build material comprising a powder mixture of about 95.0 wt. % to about 99.95 wt. % metallic powder and about 0.05 wt. % to about 5.0 wt. % graphene powder and performing an additive manufacturing process to produce the article from the build material. The graphene powder comprises nanoplatelets having between 1 and 30 layers of graphene.

METHOD FOR MAKING A PHOTOCATALYST AND TREATING DI CONTAMINATED WATER - US2024058798 (A1). An efficient photocatalyst nanocomposite comprising reduced graphene oxide, noble metal, and a metal oxide prepared by a one-step method that utilizes date seed extract as a reducing and nanoparticle determining size agent. The photocatalyst of the invention is a more effective sunlight photocatalyst than that prepared by traditional method in the photo decomposition of organic compounds in contaminated water.

CATALYST COMPONENT FOR ZIEGLER-NATTA OLEFIN POLYMERISATION CATALYST PRODUCTIVITY - US2024059804 (A1). Graphene oxide (GO)/silica (SiO₂) supported Ziegler-Natta (Z-N) catalysts are described. The catalyst includes a Z-N catalyst attached to a GO/SiO₂ support. The GO/SiO₂ support has a weight ratio of GO:SiO₂ of greater than 1:5 and includes least 25 mol. % oxygen (O) atoms. Methods of making the catalyst and use of the catalyst in alpha-olefin polymerisation reactions are also described.

GRAPHENE-BASED ANTIVIRAL POLYMER - US2024059231 (A1). An antiviral material is provided. The antiviral material includes a polymeric matrix and graphene particles dispersed in the polymeric matrix at a concentration of greater than or equal to about 0.05 wt. % to less than or equal to about 10 wt. % based on the total weight of the antiviral material, wherein the antiviral material exhibits antiviral activity. Methods of making the antiviral material and uses of the antiviral material are also provided.

IGH POWER PPTC HEATER FOR LOW LIMITING TEMPERATURE OPERATION - US2024064868 (A1). A resistance heater may include a polymer positive temperature coefficient (PPTC) material, arranged in a PPTC body defining a heater main surface. The PPTC material may include a polymer matrix, the polymer matrix defining the PPTC body, and a graphene filler

component, disposed in the polymer matrix. The resistance heater may include an electrode assembly, comprising a first electrode and a second electrode arranged in contact with the heater body at two or more locations, a first lead, connected to the first electrode, and a second lead, connected to the second electrode. As such, the electrode assembly may define a current path between the first lead and the second lead, the current path comprising a first portion, extending along the heater main surface, and a second portion, extending through the heater body.

GRAPHENE TRANSISTOR AND METHOD OF MANUFACTURING A GRAPHENE TRANSISTOR - US2024063289 (A1). The present invention provides a method of manufacturing a graphene transistor 101, the method comprising: (a) providing a substrate having a substantially flat surface, wherein the surface comprises an insulating region 110 and an adjacent semiconducting region 105; (b) forming a graphene layer structure 115 on the surface, wherein the graphene layer structure is disposed on and across a portion of both the insulating region and the adjacent semiconducting region; (c) forming a layer of dielectric material 120 on a portion of the graphene layer structure which is itself disposed on the semiconducting region 105; and (d) providing: a source contact 125 on a portion of the graphene layer structure which is itself disposed on the insulating region 110; a gate contact 130 on the layer of dielectric material 120 and above a portion of the graphene layer structure which is itself disposed on the semiconducting region 105; and a drain contact 135 on the semiconducting region 105 of the substrate surface.

PREPARATION METHOD FOR BISMUTH ION FUNCTIONAL GRAPHENE AGRICULTURAL FILM - WO2024037657 (A1). The present invention provides a preparation method for a bismuth ion functional graphene agricultural film, comprising the following steps: mixing: putting an oil-based bismuth ion graphene material and plastic granules into a blender for blending, and drying after the blending to obtain a mixture for later use; granulation: adding the mixture into an extruder, melting, mixing, extruding, cooling, pelletizing, and drying to obtain functional masterbatches; and film blowing: adding the functional masterbatches into a film blowing machine for film blowing to obtain a bismuth ion functional graphene agricultural film. The bismuth ion functional graphene agricultural film has a better heat insulation effect when being used as a greenhouse film, and can kill bacteria and harmful viruses on the ground when being used as a mulch film and a waterproof base film; moreover, bis-

mut ions effectively inhibit harmful fungi from infecting plant roots, and also achieve the function of preventing groundworm infestations.

FUEL CELL GRAPHENE-BASED MATERIAL FOR CAPTURING CATALYST PARTICLES - US2024063402 (A1). A fuel cell catalyst layer includes a catalyst support, a catalyst material, and a graphene-based material. The catalyst material includes catalyst particles in an atomic form at a beginning of operation or life of the fuel cell catalyst layer. The graphene-based material includes defects capturing dissolved particles ionized from the atomic form after the beginning of operation or life of the fuel cell catalyst layer.

NEGATIVE ELECTRODE, PREPARATION METHOD THEREFOR, AND APPLICATION THEREOF - US2024063361 (A1). The present disclosure provides a negative electrode, a preparation method therefor, and an application thereof. In the process of preparing a negative electrode of the present disclosure, a graphite material is mixed with a graphene-coated silicon-oxygen material, and the graphene-coated silicon-oxygen material is prepared by means of spray drying. The present disclosure not only uses the advantages of graphite in cycle life and low-temperature capacity retention, but also makes full use of the advantages of the silicon-oxygen material, thereby reducing the areal density and compaction density of a negative electrode, thereby significantly improving the cycle life of a battery.

METHOD FOR PREPARING GRAPHENE-GOLD COMPOSITES FOR THE ELECTROCHEMICAL SENSING OF URIC ACID IN FLUIDS AND URINE. - MX2021012265 (A). The present invention discloses manufacturing methods of nanometric graphene-Au materials obtained from high shear cleavage (graphene nanoplatelets) and doped with gold nanoparticles obtained from in situ chemical reduction of HAuCl₄ trihydrate in different ratios. The method uses other reducing agents in an alkaline medium, such as ascorbic acid or ethylene glycol, successfully used in the electrochemical quantification of uric acid, obtaining high sensitivities in the direct quantification of uric acid in untreated urine samples.

VEHICLE HARD SURFACE COMPOSITION CONTAINING GRAPHENE. - MX2022010183 (A) - A vehicle hard surface cleaning composition is provided that includes a surfactant present from 0.1 to 8.0 total weight percent, a hydrotrope present from 0.1 to 3.0 total weight percent, a wetting agent present from 0.1 to 5.0 total weight percent, a protectant present from 0.01 to 17 total weight percent, and a diluent making up a remainder of the composition. A method of cleaning a vehicle hard surface include

applying the composition thereto and washing the composition therefrom to leave a residue of graphene or graphene oxide.

CATION EXCHANGE MEMBRANE FOR ELECTROLYSIS BASED GRAPHENE OXIDE GRAFTED NAFION AND WATER ELECTROLYSIS SYSTEM THEREOF - KR20240019589 (A). The present invention relates to a branched copolymer proton exchange membrane comprising a Nafion-grafted graphene oxide, and a water electrolysis system using same. The present invention provides excellent chemical stability due to comprising fluorene, which is stable to radicals, and having a polymer main chain entirely consisting only of C-C bonds, and the manufactured composite membrane has improved hydrogen ion conductivity by comprising a modified graphene oxide.

SEMICONDUCTOR DEVICE WITH COMPOSITE CONDUCTIVE FEATURES AND METHOD FOR FABRICATING THE SAME - TW202339158 (A). The present application discloses a semiconductor device and a method for fabricating the semiconductor device. The semiconductor device includes a first semiconductor structure and a first connecting structure, wherein the first connecting structure includes a first connecting insulating layer positioned on the first semiconductor structure, two first conductive layers positioned in the first connecting insulating layer, and a first porous layer positioned between the two first conductive layers. A porosity of the first porous layer is between about 25% and about 100%. The first semiconductor structure includes a plurality of first composite conductive features, wherein at least one of the plurality of first composite conductive features includes a first protection liner, a first graphene liner in the first protection liner and a first core conductor in the first graphene liner.

COMPOSITE MATERIAL INCLUDING THREE-DIMENSIONAL (3D) GRAPHENE - TW202340387 (A). A composite material includes a combination including a thermoplastic resin mixed with a polypropylene-graft-maleic anhydride (PPgMA), and a plurality of carbon particles mixed in the combination. The plurality of carbon particles may include a first region having a relatively low concentration of carbon particles, and a second region having a relatively high concentration of carbon particles. In some instances, at least some of the plurality of carbon particles have exposed carbon surfaces with carbon atoms oxidized with one or more oxygen-containing groups and bonded to molecular sites on adjacent PPgMA molecules, wherein at least some of the plurality

of carbon particles are formed from one or more of a plurality of interconnected crinkled 3D graphene sheets or a plurality of non-hollow carbonaceous spherical particles (NHCS). In some aspects, composite material includes between 80 wt% and 90 wt% of the thermoplastic resin between 0.5 wt% and 15 wt% of the PPgMA, and between 0.1 wt% to 7 wt% of the plurality of carbon particles. The composite material may also include a plurality of pores, formed in the combination, and configured to be infiltrated by the PPgMA.

CEMENT COMPOSITIONS WITH 3D GRAPHENE CARBONS - TW202340116 (A). Cement compositions including ordinary Portland cement, a secondary cementitious material (SCM) including one or more of pozzolan, metakaolin, limestone, or gypsum in an amount corresponding to at least approximately 70% replacement level of ordinary Portland cement, and between about 0.05% bwoc and 2% bwoc of aggregates of 3-dimensional graphene (3DG) carbons. The cement compositions regulate nucleation and time-lapsed growth of calcium silica hydrates during initial hydration. The 3DG carbons include one or more of graphene nanoplatelets orthogonally joined to each other to form a 3D porous graphene scaffold structure. The 3DG carbons may also include a plurality of aggregates of carbon nanoparticles characterized by a plurality of porous concentric shells including graphene, where each shell encloses a porous carbon region and an interconnected porous network disposed in each carbon region and in fluid communication with contiguous carbon regions.

COMPOSITE SUBSTRATE, LAMINATE, METHOD FOR PRODUCING COMPOSITE SUBSTRATE, AND METHOD FOR PRODUCING LAMINATE - TW202339947 (A). A composite substrate according to the present invention is for production of a graphene film, and comprises, in the following order, a substrate which has a thermal expansion coefficient of not more than $2.0 \times 10^{-6} (K^{-1})$, an oxide film, and a metal film containing Cu or Ni, wherein, in a chart obtained by XRD measurement of the metal film with a $[\Theta]-2[\Theta]$ method, a prescribed diffraction peak is observed and a diffraction peak other than the prescribed diffraction peak is unobserved, or the intensity of the diffraction peak other than the prescribed diffraction peak is not more than 1/10 of the intensity of the prescribed diffraction peak.

LIGHT EMITTING ELEMENT, DISPLAY DEVICE, METHOD FOR PRODUCING LIGHT EMITTING ELEMENT, AND METHOD FOR PRODUCING DISPLAY DEVICE -

WO2024034018 (A1). A light emitting layer (24REM) provided in a light emitting element comprises: a nanoparticle layer (31) including nanoparticles (QD); and graphene layers (30, 32) that are in contact with the nanoparticle layer (31) and each contain a graphene oxide (GRO) having a functional group which has a property of coordinating with the nanoparticles (QD).

LASER-INDUCED GRAPHENE AND PREPARATION METHOD THEREFOR - WO2024032649 (A1). The present invention provides laser-induced graphene and a preparation method therefor. In the method, a laser is used to irradiate a cellulose composite precursor-containing LIG substrate so as to prepare a graphene composite material. The specific implementation method comprises: preparing the cellulose composite precursor-containing LIG substrate, and irradiating a precursor with the laser. The precursor may be graphene oxide, polyimide, or lignin. The present invention further provides a flexible graphene composite material, which comprises a substrate layer and a graphene functional layer. The graphene functional layer is attached to the surface of the substrate layer. The graphene functional layer comprises laser-induced graphene and has a three-dimensional pore channel structure. In the structure of the graphene-layered composite material, part of cellulose is connected to the substrate layer and the graphene functional layer, and the part thereof entering the graphene functional layer is converted into carbonized cellulose; molecules of the part of cellulose and the carbonized cellulose are intertwined with each other to form a net-shaped structure, and the laser-induced graphene is nested in the net-shaped structure.

GRADIENT TERNARY POSITIVE ELECTRODE MATERIAL, PREPARATION METHOD THEREFOR AND USE THEREOF - WO2024031911 (A1). Provided in the present application are a gradient ternary positive electrode material, a preparation method therefor and the use thereof. The preparation method comprises the following steps: (1) mixing a nickel source and a manganese source with a solvent to obtain a solution A, mixing a cobalt source and a solvent to obtain a solution B, adding the solution A, liquid caustic soda and ammonia water into a base solution at the same time for a reaction, and after the particle D50 reaches 5-8 μm , changing solution A to solution B and continuing the reaction to obtain a cobalt-coated nickel-manganese binary precursor; and (2) mixing the cobalt-coated nickel-manganese binary precursor with a lithium source, then carrying out sintering treatment to obtain an inner-core material, and by means of taking a liquid organic matter as a carbon source, coating the

surface of the inner-core material with graphene by using an atomic layer deposition method, so as to obtain the gradient ternary positive electrode material. The concentration of cobalt metal in the gradient ternary positive electrode material gradually increases from inside to outside, so that the rate capability and structural stability of the material are improved; the single-layer graphene coating improves the rate capability and cycle performance of the material to the maximum extent.

PROCESS FOR PRODUCING A MATERIAL COMPRISING GRAPHENE AND/OR GRAPHITE ON A MATRIX, AND MATERIALS PREPARED THEREFROM - WO2024031194 (A1). The present document relates to a process for the preparation of a material containing graphene grown in situ on a matrix from a carbon source, the process comprising at least one thermal treatment carried at a temperature of at least 550°C, for instance between 550°C and 1400°C, wherein the process does not include injection of external hydrogen or an inert gas.

ENERGY COLLECTION WITH RADIOACTIVE MATERIAL - WO2024030156 (A1). An energy collection system may collect and use the energy generated by an electric field. Collection fibers are suspended from a support system. Radioactive material is placed on or near the collection fibers. The support system is electrically connected to a load by a connecting wire. The collection fibers may be made of any conducting material, but graphene, carbon and graphite.

FILM FORMING METHOD AND FILM FORMING APPARATUS - JP2024019774 (A). This film forming method comprises: a step for preparing a substrate which comprises a first film that has a first surface and a second film that is different from the first film and has a second surface; a step for selectively forming a graphene-containing film on the second surface; a step for subjecting the substrate after the formation of the graphene-containing film to processing by means of a hydrogen-containing plasma; and a step for selectively forming an object film on the first surface.

Conclusions

Graphene is a very beneficial material and has many applications, but the many applications but the prominent ones are mentioned below (2):

The most famous application of graphene is considered to be the manufacturing of the robot suits. These are the costumes which are specially designed for the soldiers, and they tend to have the potential to fight against any attack yet stay safe. It is also very helpful in one of the issues of

today that is the environmental deterioration problem. It keeps one safe from all those hazards too.

Graphene could help reduce the energy cost of producing heavy water and decontamination in nuclear power plants by over one hundred times compared with current technologies(3). Producing

heavy water which needed by the nuclear industry to generate clean-energy is an expensive process. Because of graphene’s unique material properties it has the potential to effectively separate sub-atomic particles making this process more efficient and cost-effective.

References

1. Figovsky Oleg. О двухмерной формы углерода - графене замолвим мы слово. Agency “Proatom”, 18.07.2023.
2. Applications of Graphene in the Military. https://www.eda.europa.eu/docs/default-source/eda-factsheets/factsheet_graphene-applications-for-defence.
3. Graphene membranes can make nuclear industry greener. <https://www.manchester.ac.uk/discover/news/graphene-membranes-can-make-nuclear-industry-greener/>, 9 May 2017.

Литература

1. Фиговский Олег. О двухмерной формы углерода - графене замолвим мы слово. Агентство “Проатом”, 18.07.2023.
2. Применение графена в военных целях. https://www.eda.europa.eu/docs/default-source/eda-factsheets/factsheet_graphene-applications-for-defence.
3. Графеновые мембраны могут сделать атомную промышленность экологичнее. <https://www.manchester.ac.uk/discover/news/graphene-membranes-can-make-nuclear-industry-greener/>, 9 мая 2017 г.

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Figovsky Oleg	DSc, academician European Academy of Sciences (EAS), President Israel Innovation Authority? figovsky@gmail.com

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Фиговский Олег Львович	доктор технических наук, академик Европейской академии наук, Президент Израильской Ассоциации Изобретателей, figovsky@gmail.com

the article was submitted 28.02.2024	approved after reviewing 12.03.2024	accepted for publication 03.04.2024
статья поступила в редакцию 28.02.2024	одобрена после рецензирования 12.03.2024	принята к публикации 03.04.2024

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РЕЗИН, ПОЛУЧЕННЫХ В ПРИСУТСТВИИ КОМПЛЕКСНЫХ АКТИВАТОРОВ ВУЛКАНИЗАЦИИ И УСКОРИТЕЛЕЙ РАЗНЫХ КЛАССОВ

Ольга Викторовна Карманова[✉] 1 karolga@mail.ru
Александр Александрович Голякевич 1 sasha4292@yandex.ru
Екатерина Александровна Меренкова 1 katerinkamerenkova@mail.ru
Анастасия Борисовна Благина 1 ricebun@yandex.ru

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, 19, проспект Революции, Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследований свойств резин в зависимости от типа применяемых ускорителей и активаторов вулканизации. Получены активаторы вулканизации в виде комплекса оксида цинка и стеариновой кислоты на минеральном носителе, в качестве которого использовали компоненты с развитой поверхностью и высокой сорбционной емкостью: бентонит, диатомит, диоксид кремния. Исследованы свойства резин на основе синтетического полиизопрена, сшитого серой в присутствии разных ускорителей вулканизации: *N*-циклогексил-2-бензтиазолилсульфенамида, тетраметилтиурамдисульфида, 2-меркаптобензтиазола. Установлено, что использование комплексных активаторов вулканизации позволяет улучшить распределение компонентов вулканизирующей группы в полимерной матрице и снизить содержание токсичного оксида цинка в готовых изделиях при сохранении требуемого уровня физико-механических свойств. При использовании сульфамидного ускорителя вулканизации отмечено наиболее позитивное влияние комплексного активатора вулканизации на процесс образования пространственной сетки, что подтверждается улучшением физико-механических показателей резин.

Ключевые слова: серная вулканизация, комплексный активатор вулканизации, ускоритель вулканизации, физико-механические свойства.

Для цитирования: Карманова О. В., Голякевич А. А., Меренкова Е. А., Благина А. Б. Исследование свойств резин, полученных в присутствии комплексных активаторов вулканизации и ускорителей разных классов // Инженерные технологии. 2024. № 2 (6). С. 93-99.

Original article

DEVELOPMENT OF COMPLEX FUNCTIONAL ADDITIVES FOR DIENE RUBBERS INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF RUBBERS OBTAINED ON THE CURING COMPLEX ACTIVATORS AND ACCELERATORS OF DIFFERENT CLASSES

Olga V. Karmanova[✉] 1 karolga@mail.ru
Aleksandr A. Golyakevich 1 sasha4292@yandex.ru
Ekaterina A. Merenkova 1 katerinkamerenkova@mail.ru
Anastasia B. Blagina 1 ricebun@yandex.ru

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, 19, Revolution Avenue, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The results of studies of the properties of rubbers with different types of accelerators and vulcanization activators are presented. Vulcanization activators in the form of a complex of zinc oxide and stearic acid on a mineral carrier were obtained. Components with a developed surface and high sorption capacity: bentonite, diatomite, silicon dioxide were used as mineral carriers. The properties of rubbers based on synthetic polyisoprene cross-linked with sulfur in the presence of different vulcanization accelerators: *N*-cyclohexyl-2-benzthiazolylsulfenamide, 2-mercaptobenzthiazole tetramethylthiuram disulfide were studied. It has been established that when using complex vulcanization activators, the components of the vulcanizing group are better distributed in the polymer matrix and the content of toxic zinc oxide in rubber products is reduced while maintaining the required level of physical and mechanical properties. When using a sulfamide vulcanization accelerator, the most positive effect of the complex vulcanization activator on the process of formation of a spatial network was noted, which is confirmed by an improvement in the physical and mechanical properties of rubber.

Keywords: sulfur vulcanization, complex activator, zinc oxide.

For citation: Karmanova O. V., Golyakevich A. A., Merenkova E. A., Blagina A. B. Development of complex functional additives for diene rubbers investigation of the properties of rubbers obtained on the curing complex activators and accelerators of different classes. *Ingenerye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (2 (6)): 93-99. (In Russ.).

Введение

Вулканизация – один из важнейших процессов в технологии эластомеров, приводящий к превращению пластичной резиновой смеси в высокоэластичную резину, характеризующуюся комплексом уникальных свойств, что определило ее широкое распространение в качестве конструкционного материала для изготовления комплектующих деталей различных машин, механизмов и устройств [1]. Известно [2], что каучуки общего назначения, имеющие большое количество двойных связей в макромолекулах, вулканизируются в присутствии серы. Серная вулканизация ненасыщенных каучуков получила наиболее широкое распространение в технологии шин и резинотехнических изделий. Эффективность серной вулканизации обычно повышается благодаря совместному использованию ускорителей, активаторов и соактиваторов. Взаимодействие между этими соединениями отвечает за образование промежуточных металлических комплексов (действительных агентов вулканизации), которые способны повышать реакционную способность серы по отношению к полимеру и способствовать формированию вулканизационной сетки [3].

В резиновой промышленности в качестве активатора серных вулканизирующих систем широко применяется оксид цинка, который оказывает существенное влияние на образование поперечных связей и технические свойства готовых изделий [4]. Однако недостатком оксида цинка является его гидрофильный характер, который контрастирует с гидрофобной природой каучука, что влечет за собой его высокий расход для достижения хорошего распределения в полимерной матрице, это приводит к выделению оксида цинка в окружающую среду в процессе жизненного цикла резиновых изделий, в особенности при износе протекторов шин [5]. Несмотря на то, что проведены исследования по применению в качестве альтернативных активаторов вулканизации оксидов металлов, карбоксилатов и других соединений [6-9], полностью исключить оксид цинка из рецептуры резиновых смесей без их ущерба технологических,

вулканизационных свойств и эксплуатационных характеристик резин не удастся. В связи с этим поиск безопасных заменителей оксида цинка является актуальным направлением исследований.

Целью работы явилось исследование свойств резин с использованием ускорителей различных классов и комплексных активаторов вулканизации, полученных на разных минеральных носителях при сокращении содержания оксида цинка в рецептуре.

Материалы и методы исследования

Комплексные активаторы вулканизации (АВ) являются многофункциональными добавками, состоящими из оксида цинка в количестве 30 % мас. и стеариновой кислоты, которая адсорбирована на минеральном носителе. В качестве носителей применялись бентонит, диатомит и диоксид кремния. Выбор обусловлен, во-первых, их широким применением в качестве наполнителей, во-вторых, высокой адсорбционной способностью данных компонентов по отношению к жирным кислотам [10].

Процесс изготовления включал несколько стадий:

I – нанесение на поверхность минерального носителя стеариновой кислоты для получения гомогенного состава;

II – введение оксида цинка и гомогенизация в течение 40-60 минут в зависимости от состава при температуре 110-120°C.

Для анализа влияния АВ на свойства вулканизатов были изготовлены резиновые смеси на основе изопренового каучука в присутствии ускорителей вулканизации, принадлежащих к разным классам органических соединений. В качестве ускорителей использовали:

N-циклогексил-2-бензтиазолилсульфенамид (сульфенамид Ц), тетраэтилтиурамдисульфид ТМТД (тиурам Д), 2-меркаптобензтиазол 2-МБТ (каптакс). В качестве эталона использовали рецептуру на основе оксида цинка и стеариновой кислоты (таблица 1). При получении опытных образцов резиновых смесей оксид цинка и стеариновую кислоту заменяли на АВ.

Таблица 1. Рецептатура резиновой смеси
Table 1. Formulation of the rubber compound

Наименование компонентов/ Name of the components	Содержание, мас.ч.на 100 мас.ч. каучука/ Content, phr	
	Эталонные образцы/ Standard sample	Опытные образцы/ Experimental samples
СКИ-3/ Rubber SKI-3	100,0	100,0
Серы/ Sulfur	2,0	2,0
Комплексный активатор/ Complex activator	-	5,0
Оксид цинка/ Zinc Oxide	5,0	-
Стеариновая кислота/ Stearic acid	2,0	-
Ускоритель/ Accelerator	1,0	1,0
Технический углерод/ Carbon black	60,0	60,0

Изготовление смесей проводилось в резиносмесителе РС-0,1 в соответствии с разработанным технологическим режимом и дальнейшей доработкой на лабораторных вальцах ЛБ 320 160/160. Режим вулканизации для всех образцов был одинаковым для оценки свойств резин в равных условиях. В соответствии со стандартами проведены физико-механические испытания вулканизатов, оценена твердость по Шору А и содержание свободной серы, определены параметры вулканизационной сетки с помощью равновесного набухания в толуоле [11].

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты оценки физико-механических испытаний и вулканизационных свойств резин на основе сульфенамида Ц, полученных с применением комплексных активаторов на разных минеральных носителях и

результаты эталонных резин на основе оксида цинка и стеариновой кислоты представлены в таблице 2. Видно, что использование в составе вулканизирующей группы комплексных активаторов вулканизации на бентоните и диатомите способствует увеличению условной прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве. Следовательно, можно предположить, что сплав лучше диспергируется, равномернее распределяется в резиновой смеси и образование действительных агентов вулканизации протекает более эффективно [3]. АВ на белой саже показал результаты немного ниже, чем эталон. При исследовании плотности сшивания поперечных связей все опытные вулканизаты показали близкие значения с эталоном, а также характеризовались низким содержанием несвязанной серы, что объясняет высокую концентрацию поперечных связей.

Таблица 2. Влияние активаторов на свойства резин, полученных с использованием сульфенамида Ц.
Table 2. The effect of activators on the properties of rubbers obtained using sulfonamide C.

Показатель/ Indicator	Эталон/ Reference	Тип минерального носителя в АВ/ The type of mineral carrier in the vulcanization activator		
		Бентонит/ Bentonite	Диатомит/ Diatomite	Диоксид кремния/ Silica
Условное напряжение при удлинении 300 %, МПа/ Modulus at 300 %, МПа	14,4	16,5	16,1	15,2
Условная прочность при растяжении, МПа/ Tensile strength, МПа	17,2	18,1	17,7	16,8
Относительное удлинение при разрыве, %/ Elongation at break, %	310	360	360	310
Твердость по Шору А, усл.ед./ Shore A Hardness	66	66	68	68
Эффективная концентрация поперечных связей $\times 10^{20}$, см ⁻³ / Crosslink concentration $\times 10^{20}$, см ⁻³	7,8	8,1	7,8	7,8

Вулканизаты на основе тиурама Д (таблица 3) с активаторами на бентоните и на диатомите показали более высокие значения условной прочности при растяжении, чем эталонные образцы, при этом все опытные образцы имели высокое относительное удлинение при разрыве. Несмотря на то, что эффективная концентрация поперечных связей в них ниже эталона, все вулканизаты полученные с ускорителем тиурам Д (таблица 3) от-

личаются самой высокой степенью сшивки по сравнению с резинами на основе сульфенамида Ц и каптакса (таблица 4), что согласуется с данными по свободной сере – образцы с тиурамом Д имели самые низкие значения этого показателя (рисунок 1), что свидетельствует о практически полном связывании серы в процессе образования серных поперечных связей.

Таблица 3. Влияние активаторов на свойства резин, полученных с использованием тиурама Д

Table 3. The effect of activators on the properties of rubbers obtained using tiuram D

Показатель/ Indicator	Эталон/ Reference	Тип минерального носителя в АВ/ The type of mineral carrier in the vulcanization activator		
		Бентонит/ Bentonite	Диатомит/ Diatomite	Диоксид кремния/ Silica
Условное напряжение при удлинении 300 %, МПа/ Modulus at 300 %, МПа	13,9	13,2	12,8	12,6
Условная прочность при растяжении, МПа/ Tensile strength, МПа	14,1	14,5	14,5	14,0
Относительное удлинение при разрыве, %/ Elongation at break, %	260	305	320	270
Твердость по Шору А, усл.ед./ Shore A Hardness	70	68	66	68
Эффективная концентрация поперечных связей $\times 10^{20}$, см ⁻³ / Crosslink concentration $\times 10^{20}$, см ⁻³	8,4	8,0	7,9	8,0

Результаты исследования свойств вулканизатов на основе каптакса приведены в таблице 4. При используемом режиме вулканизации опытные резины показали результаты ниже эталона. При сравнении образцов с каптаксом с образцами на основе других ускорителей,

содержание свободной серы в них самое высокое.

Результаты оценки содержания свободной серы во всех исследуемых образцах представлены на рисунке 1.

Таблица 4. Влияние активаторов на свойства резин, полученных с использованием каптакса

Table 4. The effect of activators on the properties of rubbers obtained using captax

Показатель/ Indicator	Эталон/ Reference	Тип минерального носителя в АВ/ The type of mineral carrier in the vulcanization activator		
		Бентонит/ Bentonite	Диатомит/ Diatomite	Диоксид кремния/ Silica
Условное напряжение при удлинении 300 %, МПа/ Modulus at 300 %, МПа	6,8	6,6	6,5	6,1
Условная прочность при растяжении, МПа/ Tensile strength, МПа	13,1	10,7	11,2	9,9
Относительное удлинение при разрыве, %/ Elongation at break, %	440	400	440	400
Твердость по Шору А, усл.ед./ Shore A Hardness	64	60	60	58
Эффективная концентрация поперечных связей $\times 10^{20}$, см ⁻³ / Crosslink concentration $\times 10^{20}$, см ⁻³	6,4	6,0	6,1	6,1

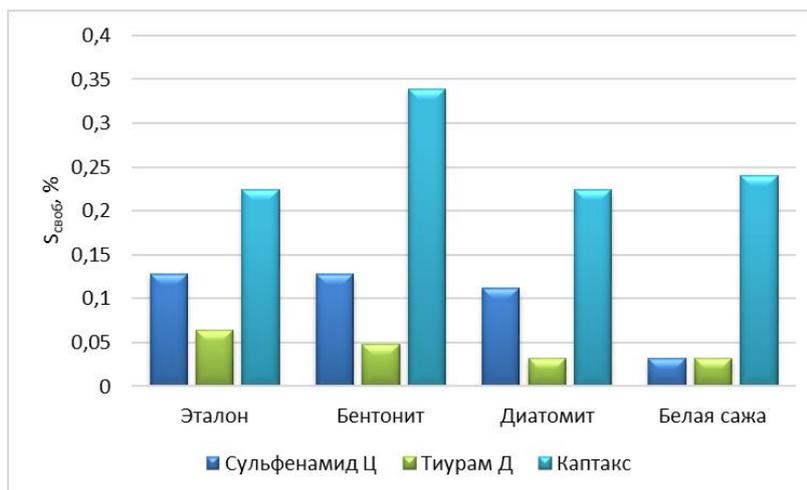


Рисунок 1. Содержание свободной серы в резинах, полученных с применением комплексных активаторов вулканизации на разных минеральных носителях и ускорителями разных типов

Figure 1. Content of free sulfur in rubbers obtained using complex vulcanization activators on different mineral carriers and accelerators of different types

Установлено, что независимо от типа применяемых активаторов вулканизации, ускорители по-разному влияют на образование поперечных связей в каучуке при вулканизации и на упруго-прочностные свойства резин. При использованном режиме вулканизации лучшие результаты имели опытные образцы на основе ускорителей сульфенамида Ц и тиурама Д. Снижение физико-механических показателей при использовании каптакса может быть обусловлено особенностями формирования пространственной сетки на разных стадиях процесса, например, расходом оксида цинка на взаимодействие с меркаптобензотриазолом и образованием меркаптида цинка, что требует проведения дополнительных исследований и обоснования, в том числе при других параметрах (температура, продолжительность) вулканизации.

При сопоставлении образцов полученных с использованием оксида цинка и стеариновой кислоты с образцами на основе комплексных АВ можно сделать вывод, что независимо от типа минерального носителя комплекс упруго-прочностных свойств и структурных параметров вулканизатов остается на уровне или даже лучше, чем у эталонных резин. Следовательно, комплексные активаторы являются перспективной разработкой для ис-

пользования в рецептурах на основе ненасыщенных каучуков.

Выводы

В ходе проведенных исследований получены зависимости изменения физико-механических свойств резин и структурных параметров вулканизатов при замене оксида цинка и стеариновой кислоты на комплексный активатор вулканизации в присутствии ускорителей вулканизации разных типов. Показано, что применение в качестве минерального носителя бентонита и диатомита для синтеза комплексного активатора вулканизации имеет преимущества по сравнению с диоксидом кремния.

Анализ результатов показал возможность снижения дозировки оксида цинка и сохранения требуемых свойств вулканизатов при использовании комплексных активаторов. Практический интерес представляет проведение расширенных испытаний комплексных активаторов с разными минеральными носителями и получение базы данных для прогнозирования технических свойств резин.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям, договор № 2 ГУРБ/2022 от 24.05.1022 г.

The work was carried out with the financial support of the Innovation Assistance Fund, Agreement No. 2 GURB/2022 dated 05/24/1022.

Литература

1. Большой справочник резинщика : в 2 ч. / под ред. С. В. Резниченко, Ю. Л. Морозова. – Москва : Техинформ, 2012. – 25 с.
2. Maciejewska M, Siwek M. The Influence of Curing Systems on the Cure Characteristics and Physical Properties of Styrene-Butadiene Elastomer. *Materials* (Basel). 2020 Nov 25;13(23):5329. doi: 10.3390/ma13235329. PMID: 33255589; PMCID: PMC7728149.
3. Догадкин Б.А., Донцов А.А., Шершнева В.А. Химия эластомеров // М.: Химия. - 1981. – 376 с.
4. Mostoni, S.; Milana, P.; Di Credico, B.; D'Arienzo, M.; Scotti, R. Zinc-Based Curing Activators: New Trends for Reducing Zinc Content in Rubber Vulcanization Process. *Catalysts* 2019, 9, 664. <https://doi.org/10.3390/catal9080664>.
5. Карманова, О. В. Особенности формирования структуры вулканизатов / О. В. Карманова, В. В. Калмыков // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2006. – Т. 8, № 2. – С. 112-116.
6. Карманова, О. В., Лынова А. С., Шутилин Ю. Ф. Формирование вулканизационной структуры резин в присутствии различных активаторов вулканизации // Каучук и резина. – 2020. – Т. 79, № 3. – С. 150-153.
7. Ващенко, Ю. Н. Композиционные активаторы вулканизации с использованием эфиров жирных кислот для карбоцепных эластомеров / Ю. Н. Ващенко, В. А. Хитун, Р. М. Долинская // Нефтехимия-2021 : материалы IV Международного научно-технического форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 22–24 ноября 2021 года. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2021. – С. 109-110.
8. Сравнение адсорбционных свойств оксида цинка и шунгита в связи с их действием в качестве активаторов серной вулканизации / Е. А. Астахова, К. Б. Хоанг, В. А. Шершнева, С. В. Резниченко // Вестник МИТХТ им. М.В. Ломоносова. – 2012. – Т. 7, № 4. – С. 88-95.
9. Карманова О. В., Тихомиров С. Г., Попова Л. В., Фатнева А.Ю. Исследование свойств резин в присутствии композиционного активатора вулканизации // Каучук и резина. – 2020. – Т. 79, № 1. – С. 28-31.
10. Патент No 2392299 С2 Российская Федерация, МПК С11В 3/00. способ адсорбционной очистки растительных масел : No 2008119153/13 : заявл. 14.05.2008 : опубл. 20.06.2010 / В. Г. Бакун, А. П. Савостьянов, В. В. Пономарев.
11. Аверко-Антонович, И. Ю. Методы исследования структуры и свойств полимеров / И. Ю. Аверко-Антонович, Р. Т. Бикмуллин. – Казань: КГТУ, 2002. – 604 с.

References

1. The great guide of the rubber man: in 2 hours / edited by S. V. Reznichenko, Yu. L. Morozov. – Moscow : Techinform, 2012. – 25 p.
2. Maciejewska M, Siwek M. The Influence of Curing Systems on the Cure Characteristics and Physical Properties of Styrene-Butadiene Elastomer. *Materials* (Basel). 2020 Nov 25;13(23):5329. doi: 10.3390/ma13235329. PMID: 33255589; PMCID: PMC7728149.
3. Guadkin B.A., Dontsov A.A., Shershnev V.A. Chemistry of elastomers // Moscow: Khimiya. - 1981. – 376 p.
4. Mostoni, S.; Milana, P.; Di Credico, B.; D'Arienzo, M.; Scotti, R. Zinc-Based Curing Activators: New Trends for Reducing Zinc Content in Rubber Vulcanization Process. *Catalysts* 2019, 9, 664. <https://doi.org/10.3390/catal9080664>
5. Karmanova, O. V. Features of the formation of the vulcanizate structure / O. V. Karmanova, V. V. Kalmykov // Condensed media and interphase boundaries. - 2006. – Vol. 8, No. 2. – pp. 112-116.
6. Karmanova, O. V., Lynova A. S., Shutilin Yu. F. Formation of the vulcanization structure of rubbers in the presence of various vulcanization activators // Rubber and rubber. - 2020. – vol. 79, No. 3. – pp. 150-153.
7. Vashchenko, Yu. N. Composite vulcanization activators using fatty acid esters for carbon-chain elastomers / Yu. N. Vashchenko, V. A. Khitun, R. M. Dolinskaya // Petrochemistry-2021 : materials of the IV International Scientific and Technical Forum on Chemical Technologies and Oil and Gas Processing, Minsk, November 22-24, 2021. – Minsk: Belarusian State Technological University, 2021. – pp. 109-110.
8. Comparison of the adsorption properties of zinc oxide and shungite in connection with their action as activators of sulfur vulcanization / E. A. Astakhova, K. B. Hoang, V. A. Shershnev, S. V. Reznichenko // Bulletin of the Lomonosov Moscow Art Institute. – 2012. – Vol. 7, No. 4. – pp. 88-95.

9. Karmanova O. V., Tikhomirov S. G., Popova L. V., Fatneva A. Yu. Investigation of the properties of rubbers in the presence of a composite vulcanization activator // Rubber and rubber. - 2020. – Vol. 79, No. 1. – pp. 28-31.

10. Patent No. 2392299 C2 Russian Federation, IPC C11B 3/00. method of adsorption purification of vegetable oils : No. 2008119153/13 : application. 05/14/2008 : publ. 06/20/20 / V. G. Bakun, A. P. Savostyanov, V. V. Ponomarev.

11. Averkо-Antonovich, I. Yu. Methods of studying the structure and properties of polymers / I. Yu. Averkо-Antonovich, R. T. Bikmullin. – Kazan: KSTU, 2002. – 604 p.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Карманова Ольга Викторовна	доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», заведующий кафедрой Технологии органических соединений и переработки полимеров, karolga@mail.ru SPIN-код 6289-1989 ORCID 0000-0003-2226-6582 Researcher ID D-7259-2014 Scopus Autor ID 6506895263
Голякевич Александр Александрович	аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», sasha4292@yandex.ru SPIN-код 3191-1767
Меренкова Екатерина Александровна	студент 4 курса обучения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», katerinkamerenkova@mail.ru
Благина Анастасия Борисовна	студент 3 курса обучения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», ricebun@yandex.ru

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Karmanova Olga Viktorovna	DSc, Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, Head of the Department of Technology of Organic Compounds and Polymer Processing, karolga@mail.ru SPIN-code 6289-1989 ORCID 0000-0003-2226-6582 Researcher ID D-7259-2014 Scopus Autor ID 6506895263
Golyakevich Alexander Alexandrovich	Postgraduate student, Voronezh State University of Engineering Technologies, sasha4292@yandex.ru SPIN-code 3191-1767
Merenkova Ekaterina Alexandrovna	4th year student, Voronezh State University of Engineering Technologies, katerinkamerenkova@mail.ru
Blagina Anastasia Borisovna	3rd year student, Voronezh State University of Engineering Technologies, ricebun@yandex.ru

статья поступила в редакцию
04.06.2024

одобрена после рецензирования
14.06.2024

принята к публикации
28.06.2024

the article was submitted
04.06.2024

approved after reviewing
14.06.2024

accepted for publication
28.06.2024

СВОЙСТВА РЕЗИН В ПРИСУТСТВИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ СОЛЕЙ ВЫСШИХ КАРБОНОВЫХ КИСЛОТ

Ольга Викторовна Карманова ✉	1	karolga@mail.ru
Александр Александрович Голякевич	1	sasha4292@yandex.ru
Евгения Анатольевна Острохижко	1	evgeniya.ostrokhizhko@mail.ru
Елизавета Алексеевна Хромина	1	yelizaveta.khromina@mail.ru

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, проспект Революции, д. 19, Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Осуществлён синтез серии технологически активных добавок, представляющих собой смесь карбоксилатов цинка, изучены их физико-химические свойства. Исследовано влияние полученных добавок на пласто-эластические свойства эластомерных композиций, физико-механические показатели и упруго-гистерезисные свойства вулканизатов в сравнении с импортным аналогом Struktol A50. При использовании опытных технологических добавок, полученных с использованием оксида цинка в количествах 7-15 % мас. вязкость по Муни резиновых смесей ниже, чем у эталона (резиновая смесь на основе Struktol A50). Физико-механические показатели у всех опытных образцов выше, чем у эталона, что может быть обусловлено лучшим диспергированием наполнителей и компонентов вулканизирующей группы, вследствие наблюдается более равномерное распределение напряжений, возникающих при механическом воздействии на эластомер. Полученные результаты позволили оценить характер изменения свойств резин при введении опытных технологически активных добавок в сравнении с добавкой Struktol A50 и рекомендовать их в качестве замены импортного аналога без ухудшения свойств вулканизатов.

Ключевые слова: технологически активная добавка, карбоксилат цинка, стеариновая кислота, олеиновая кислота, оксид цинка, резиновая смесь.

Для цитирования: Карманова О. В., Голякевич А. А., Острохижко Е. А., Хромина Е. А. Свойства резин в присутствии технологических добавок на основе солей высших карбоновых кислот // Инженерные технологии. 2024. № 2 (6). С. 100-107.

Original article

PROPERTIES OF RUBBERS IN THE PRESENCE OF TECHNOLOGICAL ADDITIVES BASED ON ZINC CARBOXYLATES

Olga V. Karmanova ✉	1	karolga@mail.ru
Aleksandr A. Golyakevich	1	sasha4292@yandex.ru
Evgeniya A. Ostrokhizhko	1	evgeniya.ostrokhizhko@mail.ru
Elizaveta A. Khromina	1	yelizaveta.khromina@mail.ru

¹Voronezh State University of Engineering Technology, prospect Revoljucii, 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The synthesis of a series of technologically active additives - a mixture of zinc carboxylates was carried out, their physicochemical properties have been studied. The effect of the resulting additives on the plasto-elastic properties of elastomeric compositions, physical and mechanical properties and elastic-hysteresis properties of vulcanizates were studied in comparison with the imported analogue Struktol A50. When using experimental technological additives obtained using zinc oxide in quantities of 7-15% wt. the Mooney viscosity of the rubber compounds was lower than that of the standard (rubber compound based on Struktol A50). The physical and mechanical characteristics of all prototypes were higher than those of the standard. This may be due to better dispersion of fillers and components of the vulcanizing group, and as a result, a more uniform distribution of stresses arising from mechanical action on the elastomer. The results obtained made it possible to evaluate the nature of changes in rubber properties when introducing experimental technologically active additives in comparison with Struktol A50 and recommend them as a replacement for an imported analogue without deteriorating the properties of vulcanizates.

Keywords: technologically active additive, zinc carboxylate, stearic acid, oleic acid, zinc oxide, rubber compound.

For citation: Karmanova O. V., Golyakevich A. A., Ostrokhizhko E. A., Khromina E. A. Properties of rubbers in the presence of technological additives based on zinc carboxylates. Inženerye tehnologii = Engineering technologies. 2024; (2 (6)): 100-107. (In Russ.).

Введение

При изготовлении резиновых смесей с высоким содержанием активных наполнителей в технологии шин и резинотехнических изделий часто возникают проблемы, обусловленные их плохой обрабатываемостью на технологическом оборудовании. Причиной таких проблем являются повышенные вязкость и эластичность каучуков, неудовлетворительное диспергирование наполнителей и других компонентов рецепта в матрице полимера, что приводит к таким дефектам как залипание, «шубление» резиновых смесей при обработке на оборудовании валкового типа, низкие скорости шприцевания и высокие энергозатраты и время смешения, низкие значения когезионной прочности, плохая «растекаемость» смесей при формовании и вулканизации. Возникновение подобных негативных факторов приводит к снижению производительности оборудования, ухудшению условий производства, нарушению экологических требований, отклонению показателей свойств изделий от нормативных требований, так как ухудшение переработки резиновых смесей на вальцах, каландрах приводит к регрессу показателей физико-механических свойств резин [1]. Для устранения подобных недостатков в современной технологии изготовления резины предлагается использовать технологически активные добавки (ТАД), применение которых открывает новые возможности по целенаправленному регулированию показателей технологических свойств резиновых смесей. В рецептуростроении резин технологически активные добавки выделились в самостоятельную группу ингредиентов резиновых смесей наряду с группами: полимерная основа, наполнители, компоненты вулканизирующей системы, стабилизаторы, модификаторы [2-3].

Технологические добавки должны удовлетворять ряду требований:

- температура плавления ТАД - не выше температуры смешения композиций;
- ограниченная молекулярная растворимость в каучуках (в отличие от мягчителей и пластификаторов);
- наличие функциональных групп разной полярности;
- доступная сырьевая база;
- не ухудшают показатели вулканизационных свойств резиновых смесей и физико-механических показателей вулканизатов [4].

А настоящее имеющийся на рынке ассортимент ТАД в основном представлен продуктами иностранного производства высоким

ценообразованием. В качестве таких продуктов используют материалы под брендом Struktol (смеси цинковых солей ненасыщенных жирных кислот), Ultra-lube (смеси амидов, эфиров и солей металлов), Ultra-flow (цинковые соли жирных кислот) и др. [5].

В эластомерах действие стеариновой кислоты проявляется и в каучуках растворной полимеризации, и в эмульсионных полимерах: остаточные компоненты адсорбируются на поверхности наполнителя, вызывая действия, сходные со стеариновой кислотой. При отсутствии их стеариновая кислота снижает вязкость, а также уменьшает взаимодействие наполнителя с полимером, что приводит к уменьшению сшиваемости макромолекул каучука [6]. Включение окиси цинка в полимеры может значительно улучшить механические свойства, например, условную прочность при растяжении на 53,8% [7].

Основное воздействие ТАД оказывают на внутри- и межмолекулярное взаимодействие в каучуке. В результате улучшается весь комплекс реологических свойств резиновых смесей. Это приводит к снижению деструкции эластомера в процессе переработки, позволяет снизить температуру переработки при высоких скоростях, улучшить возможности совмещения эластомера с другими ингредиентами и получать изделия с минимумом дефектов [8-9].

В рецептурах резиновых смесей также используются композиционные ингредиенты российского производства, прежде всего активизирующие процесс вулканизации [10-12].

Целью данной работы являлось исследование возможности замены импортного аналога Struktol A50 на ТАД, изготовленные из отечественного сырья, при получении высоконаполненных резиновых смесей, используемых в технологии шин и резинотехнических изделий в условиях имеющейся технологической базы из доступного сырья с удобной выпускной формой и простых в изготовлении.

Материалы и методы исследования

Технологические добавки в виде смеси карбоксилатов цинка получены при разных соотношениях исходных компонентов, при этом дозировку оксида цинка варьировали от 7 до 20 %мас., что отражено в шифрах опытных ТАД [13]. Синтез проводился с использованием экспериментальной установки, которая представляла собой обогреваемый реактор с крышкой, оснащенный перемешивающим устройством и термометром. Процесс вели в течение заданных времени при температуре в зависимости от состава, после чего отключали

электронагрев и образец охлаждали без доступа воздуха, охлаждали и измельчали. Технические

характеристики применяемых технологических добавок приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика ТАД

Table 1. Characteristics of TAD

Наименование показателей / Name of indicators	Эталон Struktol A 50 / Reference Struktol A 50	Опытные ТАД / Experienced TAD
Внешний вид / Appearance	Голубовато-серые таблетки / Bluish-gray pastilles	Порошок или гранулы серого цвета / Gray powder or granules
Плотность, кг/м ³ / Density, kg/m ³	1100	1070-1180
Температура каплепадения, °С / Dropping point, °C	97-109	95-115
Содержание ZnO (% мас.) / ZnO content (wt.%)	14,5	7,0-20,0

Для оценки свойств ТАД и эластомеров применяли методы, описанные в соответствующих ГОСТ. Исследование свойств ТАД:

- 1) ГОСТ 32322-2013. Определение температуры каплепадения;
- 2) ГОСТ ISO 3961-2020. Определение йодного числа;
- 3) ГОСТ 31933-2. Определение кислотного числа.

Изготовление полимерных композиций осуществляли в резиносмесителе РС-0,1 в соответствии с разработанным технологическим режимом с доработкой на лабораторных вальцах ЛБ 320-160/160. Режим вулканизации 155 °С×20 мин.

Исследование свойств композиций и вулканизатов:

- 1) ГОСТ Р ИСО 289-1-2017. Определение вязкости по Муни;

- 2) ГОСТ Р 54553-2019. Резина и термоэластопласты. Определение упругопрочностных свойств при растяжении.

Для исследования свойств резиновых смесей и вулканизатов была разработана модельная композиция по образцу шинной протекторной резиновой смеси. Полимерная основа композиций включала комбинацию каучуков изопренового (СКИ-3), бутадиенового (СКД) и бутадиен-стирольного (СКС-30АРК). В качестве наполнителя применяли технический углерод марки N550. В опытные резиновые смеси вводили синтезированные технологические добавки в количестве 5 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука. Эталонном являлась резиновая смесь аналогичного состава с добавкой Struktol A50 (таблица 2). Полученные резиновые смеси имели гладкую блестящую поверхность, ровные кромки.

Таблица 2. Рецепт модельной резиновой смеси

Table 2. Recipe for model rubber mixture

Наименование компонентов / Name of components	Содержание, мас.ч. / Content, phr	
	Эталон / Rreference	Опытные / Experienced
Каучук СКИ-3 / Rubber SKI-3	40,0	40,0
Каучук СКД / Rubber SKD	30,0	30,0
Каучук СКС-30АРКМ 15 / Rubber SKS-30ARKM	30,0	30,0
Сера / Sulfur	2,0	2,0
Сульфенамид Ц / Sulfenamide C	1,5	1,5
Цинковые белила / Zinc oxide	4,5	4,5
Стеариновая кислота / Stearic acid	1,5	1,5
Масло TDAE / TDAE oil	8,0	8,0
Диафен / Diafen	1,0	1,0
Антискорчинг PVI / Anti-scorching PVI	0,2	0,2
Технический углерод N550 / Carbon black N550	60,0	60,0
Struktol A 50	5,0	-
ТАД / TAD	-	5,0

Stearic acid TDAE oil Diafen Anti-scorching PVI Carbon black N550 TAD/Struktol A 50

Результаты исследования и их обсуждение

На основе композиций олеиновой и стеариновой кислот синтезирована серия образцов ТАД при условиях, выбранных на основе рекомендаций авторов [14-15] с температурой каплепадения в диапазоне – 90-105 °С.

Таблица 3. Физико-химические свойства опытных ТАД
Table 3. Physico-chemical properties of experimental TADs

Показатели / Characteristic	Шифры образцов / Notation				
	ТАД -7/ TAD-7	ТАД-10/ TAD-10	ТАД -12/ TAD-12	ТАД-15/ TAD-15	ТАД-20/ TAD-20
Температура начала образования капли, °С / Temperature of onset of droplet formation, °С	98	99	90	100	100
Температура каплепадения, °С / Dropping point, °С	101	103	101	105	104
Йодное число, г/100 г / Iodine number, g/100 g	23,95	25,45	24,09	23,98	22,82
Кислотное число, мл/г КОН / Acid number, ml/g КОН	89,6	89,2	86,9	86,5	86,4

Температуру каплепадения определяли как температуру, при которой капля вещества отделяется от равномерно нагретой массы испытуемого вещества под действием собственного веса. Данный показатель определяли на приборе Уббеллоде [16].

Опытные образцы смешанных карбоксилатов цинка отличались температурой каплепадения. С увеличением содержания цинка температура каплепадения возрастает. Анализ данных физико-химических свойств (табл. 2) показал, что самая низкая температура каплепадения 101 °С наблюдается у ТАД-7 и у ТАД-12, а самая высокая – 105 °С у ТАД-15.

Йодное число показывает содержание непредельных связей в соединении. С использованием данного показателя можно оценить какие - насыщенные или ненасыщенные - жирных кислоты преобладают в продукте. Для

количественной оценки ненасыщенности определяют количество йода (г), необходимое для полного насыщения жирных кислот, содержащихся в 100 г пробы. Показатель «кислотное число» можно считать косвенным показателем эффективности превращения карбоновых кислот в сложные эфиры [16]. Снижение йодного и кислотного чисел обусловлено снижением содержания жирных кислот в общей массе добавки.

Наиболее высокое йодное число 25,45 г/100 г наблюдается у ТАД-10, низкое значение этого показателя 22,82 г/100 г отмечено у ТАД-20. Добавка ТАД-7 имела самое высокое кислотное число - 89,6 мл/г КОН, а добавка ТАД-20 - самое низкое - 86,4 мл/г КОН.

Результаты исследования свойств резиновых смесей и вулканизатов, полученных в присутствии ТАД приведены в таблице 4.

Таблица 4. Показатели пласто-эластических и упруго-прочностных свойств образцов
Table 4. Plasto-elastic properties and physical and mechanical properties of rubber

Наименование показателей / Name of indicators	Шифр образца / Sample code					
	Эталон / Rreference	ТАД-7/ TAD-7	ТАД-10/ TAD-10	ТАД -12/ TAD-12	ТАД-15/ TAD-15	ТАД-20/ TAD-20
Вязкость по Муни, усл. ед. / Mooney viscosity, units	47	46	44	45	45	49
Условное напряжение при удлинении на 300%, МПа / Modulus at 300 %, МПа	5,0	5,5	6,0	5,9	5,7	6,1
Условная прочность при растяжении, МПа / Tensile strength, МПа	11,1	11,5	12,4	12,6	12,1	11,9
Относительное удлинение при разрыве, % / Elongation at break, %	577	577	582	570	560	557

Вязкость по Муни является важнейшим параметром при изготовлении резиновых смесей и полуфабрикатов в технологии эластомерных изделий, и прежде всего оказывает влияние на их технологические свойства. По результатам анализа плато-эластических свойств исследуемых резиновых смесей установлено, что значения вязкости по Муни образцов с добавками ТАД-7, ТАД-10, ТАД-12, ТАД-15 ниже, чем с добавкой Struktol A 50.

Установлено, что уровню физико-механических показателей вулканизатов все опытные образцы превосходят эталона, что может указывать на наиболее равномерное распределение наполнителей, а также вулканизирующей группы, вследствие чего идёт одинаковое распределение напряжений, возникающих при механическом воздействии на эластомер.

Известно [17], что резины, содержащие в рецептуре технологические добавки, имеют улучшенные динамические характеристики, пониженные гистерезисные потери и повышенную износостойкость. Для оценки упруго-гистерезисных свойств резин проводили циклические испытания образцов в режиме «растяжение-сокращение». На диаграммах (рисунки 1-3) представлены зависимости «напряжение-деформация» для резин в присутствии опытных ТАД и добавки Struktol A50 в виде петель гистерезиса. Площадь петли гистерезиса пропорциональна количеству механической энергии, перешедшей через трение в тепло. Для опытных образцов характерна меньшая площадь петли гистерезиса.

Известно [17], что резины, содержащие в рецептуре технологические добавки, имеют улучшенные динамические характеристики, пониженные гистерезисные потери и повышенную износостойкость. Для оценки упруго-гистерезисных свойств резин проводили циклические испытания образцов в режиме «растяжение-сокращение». На диаграммах (рисунки 1-3) представлены зависимости «напряжение-деформация» для резин в присутствии опытных ТАД и добавки Struktol A50 в виде петель гистерезиса. Площадь петли гистерезиса пропорциональна количеству механической энергии, перешедшей через трение в тепло. Для опытных образцов характерна меньшая площадь петли гистерезиса.

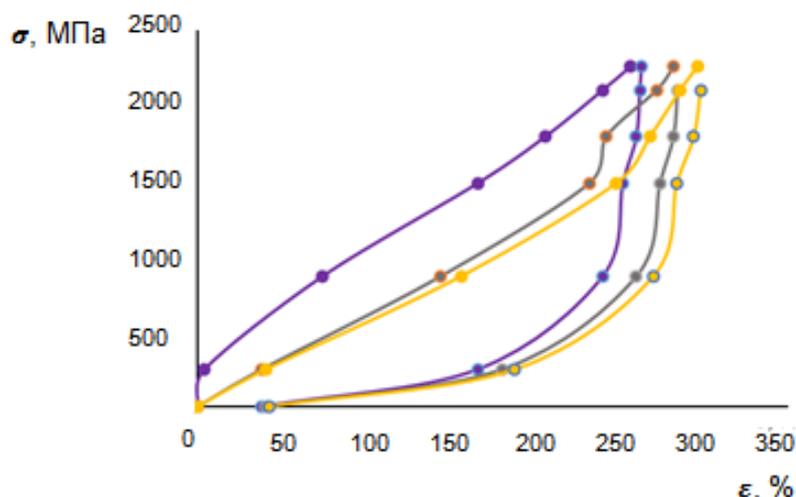


Рисунок 1. Диаграмма «растяжение-сжатие» эластомеров за 3 цикла со Struktol A50

Figure 1. Diagram “tension-compression” for elastomers in 3 cycles with–Struktol A50

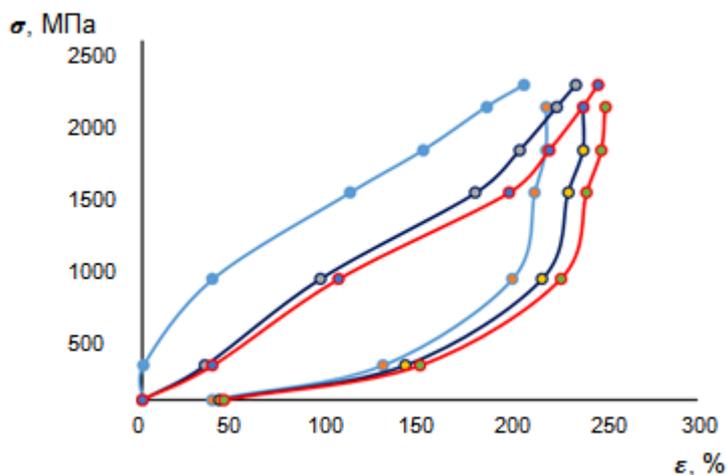


Рисунок 2. Диаграмма «растяжение-сжатие» эластомеров за 3 цикла с ТАД- 15

Figure 2. Diagram “tension-compression” for elastomers in 3 cycles with TAD- 15

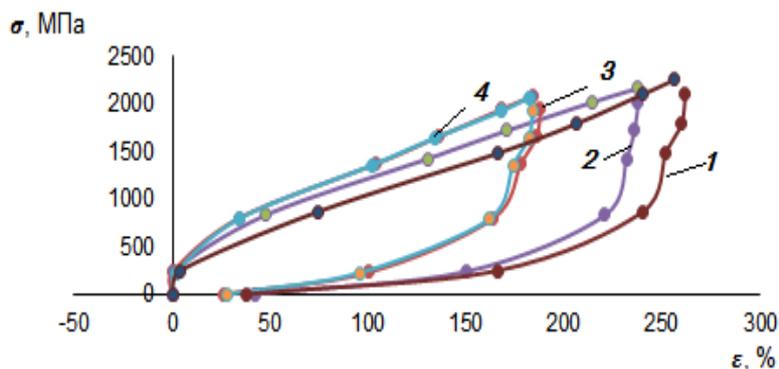


Рисунок 3. Диаграммы «растяжение-сжатие» эластомеров с различными ТАД:
1 – Struktol A50; 2 – ТАД-7; 3– ТАД-10; 4 – ТАД- 12

Figure 3. Diagram “tension-compression” for elastomers with different TAD:
1 –Struktol A50; 2 - TAD-7; 3– TAD10; 4 – TAD-12

Таким образом, в ходе сопоставительного анализа свойств резиновых смесей и резин, полученных с применением технологически активных добавок и коммерческого аналога Struktol A50 показана целесообразность замены последнего на опытные ТАД.

Выводы

Получены технологические добавки на основе смеси карбоксилатов цинка при различном соотношении исходных компонентов (жирных кислот и оксида цинка), определены их физико-химические характеристики. При изготовлении резиновых смесей по рецептуре протектора автомобильных шин установлено, что опытные продукты способствовали улучшению диспергирования порошкообразных компонентов и обеспечили требуемое качество

заготовок. По результатам исследования пласто-эластических свойств резиновых смесей можно сделать вывод о положительном влиянии опытных ТАД на перерабатываемость композиций на их основе. Показано, что с присутствием опытных ТАД физико-механические показатели резин улучшаются по сравнению с эталоном Struktol A50. На основе комплексного анализа данных определен состав ТАД, применение которой позволит заменить импортный аналог Struktol A50 без ухудшения, а в ряде случаев с улучшением свойств композиций. На основе полученных данных будет проведена оптимизация состава опытных ТАД и параметров технологического процесса с учетом технико-экономических показателей.

Литература

1. Шашок Ж.С., Усс Е.П. Технология эластомерных материалов. Ингредиенты резиновых смесей. // Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет». 2019. С. 88-89.
2. Шутилин Ю.Ф. Справочное пособие по свойствам и применению эластомеров. Воронеж: ВГТА, 2003. – 871 с.
3. Гришин Б.С. Материалы резиновой промышленности (информационно-аналитическая база данных): монография. Ч.1 / Б.С. Гришин. – Казань, КГТУ, 2010. – 506 С.
4. Макаров Т.В., Файзуллин И.З., Вольфсон С.И. Технологические добавки в процессах переработки полимерных композиционных материалов. – К.: КНИТУ, 2016. – 84 с.
5. Карманова О.В. Технологические активные добавки на основе сопутствующих продуктов производства растительного масла // Каучук и резина. 2009. №5. С. 18-21.
6. Rotheron R.N. Particulate-filled polymer composites // Rapra technology limited. 2003. P. 357-424.
7. Wang Y., Liu Li-zhi, Chengcheng T., Wang Y., Song L. Crystallization, morphology, optical properties, tear properties and antibacterial properties of nano zinc oxide composites // Journal of Dispersion Science and Technology. 2023. P. 1–22.
8. Попова Л.В., Карманова О.В., Ревин П.С., Тарасевич Т.В. Нетрадиционные методы утилизации побочных продуктов масложировой промышленности // Экология производства. 2012. № 12. С. 42-45.
9. Осошник И.А., Карманова О.В., Шутилин Ю.Ф. Технология пневматических шин: Учебн. пособ. Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2004. – 508 с.

10. Карманова, О., Тихомиров, С., Попова, Л. и Фатнева, А. 2020. Исследование свойств резин в присутствии композиционного активатора вулканизации. Журнал «Каучук и резина». 2020. Т. 79, №1. С. 28–31.
11. Glebova Y., Severin N., Rabe J.P., Shershnev V. Nitrogen-doped graphene as an alternative to ecotoxic zinc oxide in rubbers // *Journal of Applied Polymer Science*. 2018. V. 135. N 17. P. 46116.
12. Maciejewska M., Sowinska A., Kucharska J. Organic zinc salts as pro-ecological activators for sulfur vulcanization of styrene-butadiene rubber // *Polymers*. 2019. N11. P.1723.
13. Острожишко Е.А., Голякевич А.А., Карманова О.В. Получение высоконаполненных эластомерных композитов с использованием смеси карбоксилатов цинка // *Материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2024», секция «Химия»*. – М.: Издательство «Перо». 2024. – С. 912.
14. Рахматуллина А.П., Лиакумович А.Г., Ахмедьянова Р.А., Мохнаткина Е.Г. Композиции на основе стеаратов и олеатов цинка – технологические активные добавки для резиновых смесей // *Вестник Казанского технологического университета*. 2010. № 10 С. 676 – 679.
15. Basu D., Agasty A., Das A., Chattopadhyay S., Sahu P., Heinrich G. Phase changing stearate ions as active fillers in multifunctional carboxylated acrylonitrile-butadiene composite: Exploring the role of zinc stearate // *Journal of Applied Polymer Science*. 2019. V. 137. I. 2. P. 48271.
16. Govorin A.S., Konovalov N.P., Gubanov N.D., Rybarchuk O.V., Ishchuk N.A. Assessment of the effect of the product of esterification of fatty acids of tallow oils on the properties of diesel fuel // *News of universities. Applied chemistry and biotechnology*. 2022. Vol. 12, No. 2. P. 330-337.
17. Пичугин А. М. *Материаловедческие аспекты создания шинных резин*. М: ООО "Научно-технический "НИИШП". - 2008. - 383 с.

References

1. Shashok J.S., Uss E.P. Technology of elastomeric materials. The ingredients of rubber mixtures. // *Educational institution "Belarusian State Technological University"*. 2019. pp. 88-89.
2. Shutilin Yu.F. Reference manual on the properties and application of elastomers. Voronezh: VGTA, 2003. – 871 p.
3. Grishin B.S. Materials of the rubber industry (information and analytical database): monograph. Part 1 / B.S. Grishin. – Kazan, KSTU, 2010. – 506 P.
4. Makarov T.V., Fayzullin I.Z., Wolfson S.I. Technological additives in the processing of polymer composite materials. – K.: KNITU, 2016. – 84 p.
5. Karmanova O.V. Technological active additives based on related products of vegetable oil production // *Rubber and rubber*. 2009. No.5. pp. 18-21.
6. Rothon R.N. Particulate-filled polymer composites // *Rapra technology limited*. 2003. P. 357-424.
7. Wang Y., Liu Li-zhi, Chengcheng T., Wang Y., Song L. Crystallization, morphology, optical properties, tear properties and antibacterial properties of nano zinc oxide composites // *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2023. P. 1–22.
8. Popova L.V., Karmanova O.V., Revin P.S., Tarasevich T.V. Non-traditional methods of utilization of by-products of the fat and oil industry // *The ecology of production*. 2012. No. 12. pp. 42-45.
9. Ososhnik I.A., Karmanova O.V., Shutilin Yu.F. Technology of pneumatic tires: Textbook. help. Voronezh: Voronezh State Technical University. akad., 2004. – 508 p.
10. Karmanova, O., Tikhomirov, S., Popova, L. and Fatneva, A. 2020. Investigation of the properties of rubbers in the presence of a composite vulcanization activator. The magazine "Rubber and rubber". 2020. Vol. 79, No. 1. pp. 28-31.
11. Glebova Y., Severin N., Rabe J.P., Shershnev V. Nitrogen-doped graphene as an alternative to ecotoxic zinc oxide in rubbers // *Journal of Applied Polymer Science*. 2018. V. 135. N 17. P. 46116.
12. Maciejewska M., Sowinska A., Kucharska J. Organic zinc salts as pro-ecological activators for sulfur vulcanization of styrene-butadiene rubber // *Polymers*. 2019. N11. P.1723.
13. Ostrokhizhko E.A., Golyakevich A.A., Karmanova O.V. Preparation of highly filled elastomeric composites using a mixture of zinc carboxylates // *Materials of the International Scientific conference of students, postgraduates and young scientists "Lomonosov-2024", section "Chemistry"*. – М.: Publishing house "Pero". 2024. – p. 912.

14. Rakhmatullina A.P., Liakumovich A.G., Akhmedyanova R.A., Mokhnatkina E.G. Compositions based on zinc stearates and oleates – technological active additives for rubber compounds // Bulletin of the Kazan Technological University. 2010. No. 10, pp. 676-679.

15. Basu D., Agasty A., Das A., Chattopadhyay S., Sahu P., Heinrich G. Phase changing stearate ions as active fillers in multifunctional carboxylated acrylonitrile–butadiene composite: Exploring the role of zinc stearate // Journal of Applied Polymer Science. 2019. V. 137. I. 2. P. 48271.

16. Govorin A.S., Konovalov N.P., Gubanov N.D., Rybarchuk O.V., Ishchuk N.A. Assessment of the effect of the product of esterification of fatty acids of tallow oils on the properties of diesel fuel // News of universities. Applied chemistry and biotechnology. 2022. Vol. 12, No. 2. P. 330-337.

17. Pichugin A.M. Material science aspects of the creation of tire rubbers. М: LLC "Scientific and technical "NIISHP". - 2008. - 383 p.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Карманова Ольга Викторовна	доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», заведующий кафедрой Технологии органических соединений и переработки полимеров, karolga@mail.ru SPIN-код 6289-1989 ORCID 0000-0003-2226-6582 Researcher ID D-7259-2014 Scopus Autor ID 6506895263
Голякевич Александр Александрович	аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», sasha4292@yandex.ru SPIN-код 3191-1767
Острохишко Евгения Анатольевна	студент 4 курса обучения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», evgeniya.ostrokhizhko@mail.ru
Хромина Елизавета Алексеевна	студент 3 курса обучения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», yelizaveta.khromina@mail.ru

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Karmanova Olga Viktorovna	DSc, Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, Head of the Department of Technology of Organic Compounds and Polymer Processing, karolga@mail.ru SPIN-code 6289-1989 ORCID 0000-0003-2226-6582 Researcher ID D-7259-2014 Scopus Autor ID 6506895263
Golyakevich Alexander Alexandrovich	Postgraduate student, Voronezh State University of Engineering Technologies, sasha4292@yandex.ru SPIN-code 3191-1767
Ostrokhizhko Evgeniya Anatolievna	4th year student, Voronezh State University of Engineering Technologies, evgeniya.ostrokhizhko@mail.ru
Khromina Elizaveta Aleksseevna	3rd year student, Voronezh State University of Engineering Technologies, yelizaveta.khromina@mail.ru

статья поступила в редакцию
04.06.2024

одобрена после рецензирования
13.06.2024

принята к публикации
27.06.2024

the article was submitted
04.06.2024

approved after reviewing
13.06.2024

accepted for publication
27.06.2024

