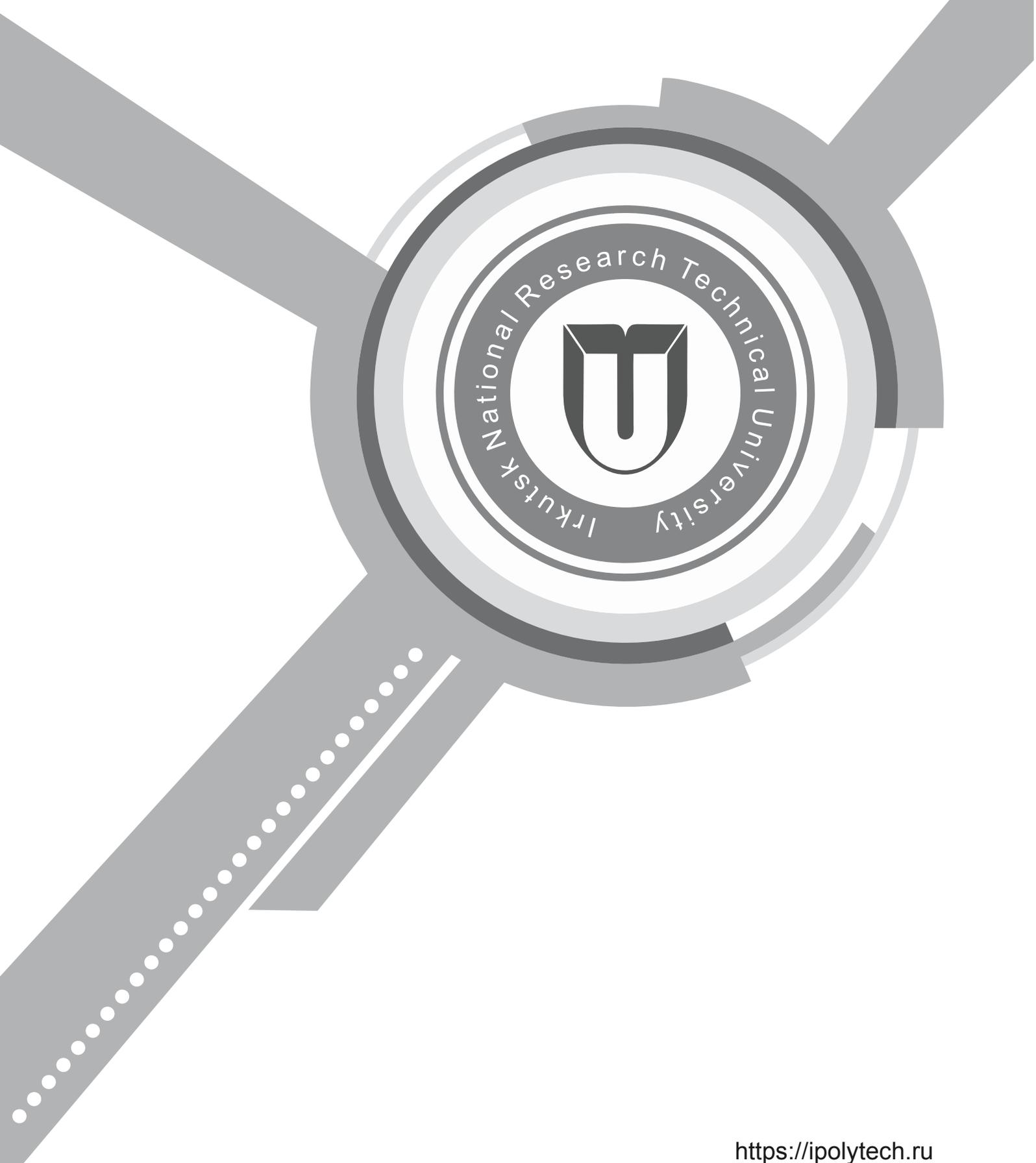


ISSN 2782-4004 (print)
ISSN 2782-6341 (online)

iPolytech Journal

Tom 27, № 4. 2023 / Vol. 27, No 4. 2023



<https://ipolytech.ru>

ISSN 2782-4004 (print)
ISSN 2782-6341 (online)

iPolytech Journal

Том 27, № 4. 2023 / Vol. 27, № 4. 2023



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал «iPolytech Journal» - ежеквартальный журнал теоретических и прикладных исследований в области машиностроения, энергетики и металлургии. С 1997 по 2021 год журнал выходил под названием «Вестник Иркутского государственного технического университета».

Периодичность издания - **4 раза в год**. Языки – **русский и английский**.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор): Регистрационный номер: **ПИ № ФС 77–82388 от 10 декабря 2021** (Ранее действовавшие Свидетельства:

И № 0327 от 19 сентября 1997 г.; ПИ №77-13046 от 15 июля 2002г.;

ПИ № ФС77- 42847 от 26 ноября 2010 г.,

ПИ № ФС77-47902 от 22 декабря 2011г.;

ПИ № ФС77-62813 от 18 августа 2015 г.).

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО ИРНИТУ).
664074, г. Иркутск , ул. Лермонтова, 83

Издательство:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск , ул. Лермонтова, 83А

Адрес редакции:

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.
e-mail: pgp@istu.edu

SCIENTIFIC JOURNAL

"iPolytech Journal" is a quarterly academic journal publishing theoretical and applied research papers in mechanical engineering, energy and metallurgy. From 1997 to 2021 the journal was published under the title "Proceedings of Irkutsk State Technical University" ((Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta) is an academic journal issued 4 times a year since 1997.

Articles are published in Russian and English.

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media: Registration certificate PI No FS77–82388 of 10 December 2021.

(previously valid certificates:

И No 0327 of September 19, 1997; ПИ No77-13046 of July 15, 2002;

ПИ No ФС77- 42847 of November 26, 2010,

ПИ No ФС77-47902 of December 22, 2011;

ПИ No ФС77-62813 of August 18, 2015).

Founder and Publishers:

The Founder and Publisher is Irkutsk National Research Technical University (INRTU)
83, Lermontov St. Irkutsk, 664074

Publishers:

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
Irkutsk National Research Technical University (INRTU)
The postal address of INRTU-Press: 664074
83, Lermontov St. Irkutsk, 664074

Founders:

83, Lermontov St., Irkutsk, 664074
e-mail: pqp@istu.edu



Редакционная коллегия

СИДОРОВ Д.Н., д. ф.-м. н., профессор, профессор РАН, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН», главный редактор (г. Иркутск) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

КОРНЯКОВ М.В., д.т.н., ректор Иркутского национального исследовательского технического университета, председатель редакционной коллегии (г. Иркутск, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

ЗАЙДЕС С.А., д.т.н., профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Машиностроение» (г. Иркутск, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

НЕМЧИНОВА Н.В., д.т.н., профессор, заведующая кафедрой металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Металлургия» (г. Иркутск, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

ФЕДОСОВ Д.С., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Энергетика» (г. Иркутск, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

БАЖИН В.Ю., д.т.н., заведующий кафедрой металлургии Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II (г. Санкт-Петербург, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

БЛЮМЕНШТЕЙН В.Ю., д.т.н., профессор Кузбасского государственного технического университета (г. Кемерово, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

БОЛДЫРЕВ А.И., д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

БОРОВИКОВ Ю.С., д.т.н., ректор Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого (г. Великий Новгород, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

ГАВЛИК ЮЗЕФ, профессор кафедры технологии производства и автоматизации Краковского технологического университета (г. Краков, Польша) (ORCID) (Scopus)

ИЛЮШИН П.В., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт энергетических исследований Российской академии наук», Руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики (г. Москва, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

КЛЕР А.М., д.т.н., главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

КОЛОСОК И.Н., д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

КРЮКОВ А.В., д.т.н., академик Российской академии транспорта, член-корр. АН ВШ РФ и Российской инженерной академии, заслуженный энергетик Республики Бурятия, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

ЛИХИ Пол, профессор кафедры ветроэнергетики, Университетский колледж Корка, исследователь, Цент морских, климатических и энергетических исследований Ирландского научного фонда MAREI (г. Корк, Ирландия) (ORCID) (Scopus)

МАМЯЧЕНКОВ С.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Уральского Федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

МАРЧУК И.В., д.ф.-м. н., профессор РАН, декан Механико-математического факультета Новосибирского государственного университета (г. Новосибирск, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

МАТЛИН М.М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой деталей машин и подъемно-транспортных устройств Волгоградского государственного технического университета (г.Волгоград, Россия) (РИНЦ) (Scopus)

МЫРЛИН В.А., д.г.-м.н., профессор Федерального университета штата Парана (Куритиба, Бразилия) (ORCID) (Scopus)

ОГАР П.М., д.т.н., профессор, профессор кафедры подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования Братского государственного университета (г. Братск, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

ПАЗДЕРИН А.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электрических систем Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

ПАНТЕЛЕЕВ В.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электрических комплексов и систем Сибирского федерального университета (г. Красноярск, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

РАШИДИ Мохаммад Мехди, доктор, профессор Университета Тунцзи (Шанхай, Китай) (ORCID) (Scopus)

СЕНДЕРОВ С.М., д.т.н., заместитель директора Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

СТЕННИКОВ В.А., академик РАН, д.т.н., профессор, директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

СТЫЧИНСКИ З.А., профессор Университета Отто-фон-Герике (г. Магдебург, Германия) (ORCID) (Scopus)

СУНЬ Хуапин, профессор Цзянсуского университета (Чженьцзян, Китай) (ORCID) (Scopus)

СУСЛОВ К.В., д.т.н., профессор Национального исследовательского университета «МЭИ» (г. Москва, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

ЛЮ ФАНГ, профессор Центрального Южного Университета (Чанша, провинция Хунань, Китай) (ORCID) (Scopus)

ХЕЙФЕЦ М.Л., д.т.н., директор Государственного научного учреждения «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси» (г. Минск, Республика Беларусь) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

ФИШОВ А.Г., д.т.н., профессор Новосибирского государственного технического университета (г. Новосибирск, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

ШОЛЬТЕС Бертольд, директор Института материаловедения Кассельского университета (г. Кассель, Германия) (ORCID) (Scopus)

Editorial Board

- Denis N. SIDOROV**, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Full Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Mikhail V. KORNIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University, chairman of the editorial board (Irkutsk, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Semen A. ZAIDES**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Head of the Department of Machine Building Technologies and Materials, Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief in Mechanical engineering (Irkutsk, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Nina V. NEMCHINOVA**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief Metallurgy (Irkutsk, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Denis S. FEDOSOV**, Candidate of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Power Plants, Networks and Systems at Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief in Energy Sciences (Irkutsk, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Vladimir Yu. BAZHIN**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Metallurgy, Saint Petersburg Mining University named after the Empress Catherine II (Saint Petersburg, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Valery Yu. BLUMENSTEIN**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Kuzbass State Technical University (Kemerovo, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Aleksander I. BOLDYREV**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Yury S. BOROVNIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Novgorod State University n.a. Yaroslav-the-Wise (Veliky Novgorod, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Josef GAVLIK**, Full Professor, Department of Production Technology and Automation, Krakow University of Technology (Krakow, Poland) (ORCID) (Scopus)
- Pavel V. ILYUSHIN**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Chief Researcher, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Head of the Center for Intelligent Electric Power Systems and Distributed Energy (Moscow, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Aleksander M. KLER**, Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Irina N. KOLOSOK**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Andrey V. KRYUKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Transport, Corresponding member of the Academy of Sciences, Higher School of the Russian Federation and the Russian Academy of Engineering, Honored Power Engineer of the Republic of Buryatia, Advanced Professor, Department of Transport Electric Power Industry, Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Paul LEAHY**, Professor at University College Cork (Department of Wind Power); Funded Investigator in the Science Foundation Ireland MAREI Centre for Marine, Climate and Energy research (Cork, Ireland) (ORCID) (Scopus)
- Sergey V. MAMYACHENKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals, Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Igor V. MARCHUK**, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Director of the Mechanics and Mathematics Department, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Mikhail M. MATLIN**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Head of the Department of Machine Parts and Hoisting-and-Transport Devices, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia) (PIHL) (Scopus)
- Vsevolod A. MYMRIN**, Dr. Sci. (Geology), Professor, Federal University of Parana (Curitiba, Brazil) (ORCID) (Scopus)
- Pyotr M. OGAR**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Bratsk State University (Bratsk, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Andrey V. PAZDERIN**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automated Electric Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Vasily I. PANTELEEV**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Head of the Department of Electrical Systems, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Mohammad Mehdi RASHIDI**, Professor Tongji University, (China) (ORCID) (Scopus)
- Sergey M. SENDEROV**, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Valery A. STENNIKOV**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Director, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Zbigniew A. STYCZYNSKI**, Professor, Otto-von-Guericke University (Magdeburg, Germany) (ORCID) (Scopus)
- Huaping SUN**, Professor, Jiangsu University (Zhenjiang, China) (ORCID) (Scopus)
- Konstantin V. SUSLOV**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (Moscow, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Fang LIU**, Professor, Central Southern University (Changsha, Hunan Province, China) (ORCID) (Scopus)
- Mikhail L. KHEIFETS**, Dr. Sci. (Eng.), Director, Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Aleksander G. FISHOV**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)
- Berholt SCHOLTES**, Director, Institute of Metal Science, University of Kassel (Kassel, Germany) (ORCID) (Scopus)



Содержание

Машиностроение

- Большаков Р.С., Каргапольцев С.К.** К вопросу о создании конструктивно-технических решений для обеспечения вибрационного перемещения рабочей среды 636
- Леквешвили М.А., Люхтер А.Б., Давыдов Н.Н.** Расчёт силовых параметров процесса формообразования заготовок концевыми фрезами. 645
- Лю Жохань, Люй Лань, Ван Суньбао, Чай Чжицян.** Метод распознавания диапазона нагрузок дискового резака при резке угля и горной породы на основе метода опорных векторов оптимизации роя частиц (англ.) 655
- Пикалов Я.Ю., Штабель Н.В., Брунгардт М.В., Ткачёв С.Б.** Автоматизированная сборка изделий роботом-манипулятором с динамометрическим контролем процесса затягивания винтовых соединений..... 664
- Поляков П.А.** Разработка способа обеспечения стабильности процесса торможения путём совершенствования конструкции тормозных механизмов 682

Энергетика

- Астапов В.Ю.** Возможность использования мультиагентного управления режимами виртуальной инерции ветроэлектрической станции 694
- Крупенёва Я.И., Болоев Е.В., Голуб И.И.** Разнесение потерь мощности и энергии в распределительной сети (англ.) 727
- Митрофанов С.В., Байкашенов Д.К.** Исследование работы солнечной электростанции с двухосевым солнечным трекером..... 737
- Михальчук Н.Л.** Выбор схемы питания управляемых преобразователей возбуждения тяговых электродвигателей электровозов однофазно-постоянного тока..... 749
- Русина А.Г., Осгонбаатар Тувшин, Бондарчук Г.С., Матрёнин П.В.** Оптимизация нормального режима работы электрической системы с возобновляемыми источниками энергии на примере Монголии 760
- Томин Н.В., Домышев А.В., Барахтенко Е.А., Шакиров В.А., Козлов А.Н., Сосновский И.К., Лю Фанг, Сидоров Д.Н.** Обзор методов моделирования и управления киберфизическими системами в мультиэнергетических микросетях 773

Металлургия

- Логинава И.В., Кырчиков А.В., Чайкин Л.И., Напольских Ю.А.** Низкотемпературное спекание бокситового сырья со щелочью - альтернативная технология переработки бокситов по параллельному варианту способа Байер-спекание 790
- Немчинова Н.В., Коновалов Н.П., Коновалов П.Н., Дошлов И.О.** Снижение экологической нагрузки на окружающую среду при производстве алюминия за счёт применения нефтяного пека .. 800
- Петров Г.В., Гордеев Д.В., Бекирова В.Р.** Сравнение способов повышения извлечения золота из золотосодержащих концентратов двойной упорности в технологии автоклавного окисления 809
- Шипнигов А.А., Епифоров А.В., Собенников Р.М., Мусин Е.Д., Баликов С.В.** Кучное сернокислотно-тиоцианатное выщелачивание золота и урана 821

Content

Mechanical engineering

- Bolshakov R.S., Kargapol'tsev S.K.** On developing structural and technical solutions to ensure the vibratory displacement of the working medium 636
- Lekveishvili M.A., Lyukhter A.B., Davydov N.N.** Calculation of force parameters of workpiece machining process with end mill cutters 645
- Liu Ruohan, Lyu Lan, Wang Sunbao, Chai Zhiqiang.** Particle swarm optimization support vector machine-based coal and rock cutting tool load spectrum identification method 655
- Pikalov Ya.Yu., Shtabel N.V., Brungardt M.V., Tkachev S.B.** Automated assembly of products by a robot-manipulator with dynamometric control of screw joint tightening 664
- Polyakov P.A.** Development of a method for providing the stability of the braking process through improvement of braking mechanisms design 682

Power engineering

- Astapov V.Yu.** Applicability of multi-agent control for virtual inertia modes in a wind power plant 694
- Krupeneva Ya.I., Boloev E.V., Golub I.I.** Allocation of power losses in the distribution network 727
- Mitrofanov S.V., Baykasenov D.K.** Operation of a solar power plant with dual-axis solar tracker 737
- Mikhailchuk N.L.** Selection of power supply scheme for controlled excitation converters in traction electric motors of singlephase DC electric locomotives..... 749
- Rusina A.G., Osgonbaatar T., Bondarchuk G.S., Matrenin P.V.** Optimization of normal operation mode of an electric system with renewable energy sources in Mongolia..... 760
- Tomin N.V., Domyshev A.V., Barakhtenko E.A., Shakirov V.A., Kozlov A.N., Sosnovskiy I.K., Liu Fang, Sidorov D.N.** Review of methods for modeling and control of cyber-physical systems in multi-energy microgrids 773

Metallurgy

- Loginova I.V., Kyrchikov A.V., Chaikin L.I., Napol'skikh Yu.A.** Low-temperature sintering of bauxite raw material with alkali as an alternative to the parallel Bayer sintering process 790
- Nemchinova N.V., Konovalov N.P., Konovalov P.N., Doshlov I.O.** Reducing the environmental impact of aluminum production through the use of petroleum pitch 800
- Petrov G.V., Gordeev D.V., Bekirova V.R.** Comparison of methods for enhancing gold recovery from double refractory concentrates using the technology of autoclave oxidation 809
- Shipnigov A.A., Epiforov A.V., Sobennikov R.M., Musin E.D., Balikov S.V.** Heap sulphuric-thiocyanate leaching of gold and uranium 821



Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию выпуск научного журнала «iPolytech Journal». Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Министерства науки и высшего образования РФ.

«iPolytech Journal» включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в электронной библиотеке «Cyberleninka», библиотеке Oxford, Directory of Open Access Journals (DOAJ), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНИТИ РАН, каждой статье присваивается цифровой индикатор DOI.

«iPolytech Journal» реферируется и рецензируется

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- **Машиностроение**
 - 2.5.2. Машиноведение
 - 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки
 - 2.5.6. Технология машиностроения
- **Энергетика**
 - 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы
 - 2.4.3. Электроэнергетика
 - 2.4.5. Энергетические системы и комплексы
- **Металлургия**
 - 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов

Редколлегия

Dear Readers!

We would like to bring to your attention the issue of the scientific journal “iPolytech Journal”.

The journal is included in the list of the leading scientific journals and publications, where the key scientific results of doctoral (candidate's) theses approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Ministry of Education are to be published.

“iPolytech Journal” is included in the “UlrichsPeriodicals Directory”, iPolytech Journal EBSCO database, Scientific electronic library (eLIBRARY.RU). It is presented in the e-library «Cyberleninka», University OXFORD, Scientific Indexing Services (SIS), Directory of Open Access Journals (DOAJ). It is sent to the Russian Book Chamber and All-Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI) RAS. Each article is assigned a digital indicator DOI.

The journal “iPolytech Journal” is abstracted and reviewed

You are welcome for active and creative collaboration
in the following fields:

- **Mechanical Engineering**
 - 2.5.2. Mechanical engineering (engineering sciences)
 - 2.5.5. Technology and equipment for mechanical and physical and technical machining (engineering sciences)
 - 2.5.6. Engineering technology (technical sciences)
- **Power Engineering**
 - 2. 4.2. Electrotechnical equipment and systems (engineering sciences)
 - 2.4.3. Electric power industry (engineering sciences)
 - 2.4.5. Energy systems and complexes (engineering sciences)
- **Metallurgy**
 - 2.6.2. Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals (engineering sciences)

Editorial Board



Научная статья
УДК 629.4.015:62-752:681.5
EDN: BESWQO
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-636–644

К вопросу о создании конструктивно-технических решений для обеспечения вибрационного перемещения рабочей среды

Р.С. Большаков^{1✉}, С.К. Каргапольцев²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Целью является проведение исследований в области применения вибрационных технологий для перемещения гранулированной рабочей среды. В качестве объекта исследования выбрана вибрационная технологическая машина с расчетной схемой в виде механической колебательной системы с двумя степенями свободы с твердым телом на упругих опорах. Изменение колебаний системы изучалось при помощи структурной теории виброзащитных систем, когда исходной расчетной схеме сопоставляется динамический аналог в виде структурной схемы системы автоматического управления. Структурная схема системы построена на основе уравнений движения в операторной форме, полученных с помощью дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода. Для трансформации исходных данных системы дифференциальных уравнений движения использовано преобразование Лапласа. Рассмотрены особенности нового конструктивно-технического решения в области обеспечения вибрационного перемещения гранулированной рабочей среды при помощи рабочего органа вибрационной технологической машины, в структуру которой введен ряд дополнительных масс, рычагов, пружин и шарниров. Пружины в данном случае представляют собой обобщенные структуры, содержащие как упругие элементы, так и демпферы. Получены аналитические соотношения, показывающие связность движения координат крайних точек рабочего органа вибрационной технологической машины. Установлено, что изменение параметров элементов упруго-рычажных блоков позволяет управлять динамическим состоянием вибрационной технологической машины. Показано, что построенная структурная схема способствует формированию математических выражений для передаточных функций, представляющих собой отношения координат движения технического объекта к внешнему силовому воздействию. На основе составленных выражений построена передаточная функция соотношения координат движения вибрационной технологической машины. Таким образом, получена математическая модель вибрационной технологической машины в виде передаточной функции, содержащей большое количество дополнительных упругих и массоинерционных элементов, с возможностями изменения параметров вибрационного перемещения в автоматическом режиме. Проведенные исследования позволяют модернизировать существующие технические решения в области технологического машиностроения.

Ключевые слова: вибрационная технологическая машина, структурное математическое моделирование, вибрационное перемещение, динамическое состояние, передаточная функция

Для цитирования: Большаков Р.С., Каргапольцев С.К. К вопросу о создании конструктивно-технических решений для обеспечения вибрационного перемещения рабочей среды // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 636–644. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-636-644>. EDN: BESWQO.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

On developing structural and technical solutions to ensure the vibratory displacement of the working medium

Roman S. Bolshakov^{1✉}, Sergey K. Kargapoltsev²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. A research study into using vibration technologies for the transport of granular working medium was carried out. A vibration testing machine, whose calculation model includes a mechanical vibration system having two degrees of freedom with a rigid body on elastic supports, was selected as an object of research. The study involved analysing the

variation in the system vibrations by using the structural theory for vibration isolation systems, where a dynamic equivalent represented by a structural diagram of an automatic control system is compared to the initial calculation model. The structural diagram of the system is based on the motion equations in operator form obtained using Lagrange differential equations of the second kind. The Laplace transform was used to transform the initial data for the system of differential motion equations. The paper addresses the characteristics of a new structural and technical solution in the field of vibratory displacement of a granular working medium using the working body of a vibration technological machine, which involves introducing a number of additional weights, levers, springs, and hinges. Here, springs comprise generalised structures containing both elastic elements and vibration dampers. To connect the coordinates of the endpoints in the working body of the vibration technological machine, analytical relations were obtained. It was established that varying the parameters of the elements within the elastic-lever blocks allows the dynamic state of the vibration technological machine to be controlled. In addition, it was shown that the obtained structural diagram helps to derive mathematical expressions for transfer functions, comprising the ratio between the motion coordinates of a technical object and an external force disturbance. On the basis of these expressions, the transfer function for the ratio of the motion coordinates of the vibration technological machine was formulated. A mathematical model of a vibration technological machine was obtained in the form of a transfer function, including a large number of additional elastic and mass-inertial elements, where the parameters of vibration displacement can be adjusted automatically. The research results will allow the existing technical solutions in the field of technological engineering to be modernised.

Keywords: vibration technological machine, structural mathematical modeling, vibratory displacement, dynamical state, transfer function

For citation: Bolshakov R.S., Kargapol'tsev S.K. On developing structural and technical solutions to ensure the vibratory displacement of the working medium. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):636-644. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-636-644>. EDN: BESWQO.

ВВЕДЕНИЕ

Для промышленных производств характерно взаимодействие в автоматическом режиме различных узлов и агрегатов, которое в большинстве случаев формирует колебательные процессы, негативно влияющие на ход эксплуатации применяемого технологического оборудования, прочность и долговечность составляющих его элементов. Формирование вибраций свойственно для многих отраслей промышленности, в том числе для машиностроения, горнодобывающей отрасли, строительства, транспорта и др. [1–6].

Учет вибраций необходим для обеспечения устойчивой работы механизмов, характерных для соответствующей отрасли промышленности, а также для получения технологических режимов, используемых при эксплуатации соответствующего технологического оборудования, что связано с решением задач настройки и корректировки динамического состояния такого оборудования с использованием различных дополнительных технических устройств, а также при помощи динамических эффектов. Развитие методологических основ в этом направлении нашло отражение в [7–10]. Также необходимо отметить ряд работ, посвященных структурному математическому моделированию [11–16], когда технические объекты анализируются при помощи формирования структурных схем, характерных для теории автоматического управления, что позволяет детализировать представления о связях между составляющими элементами для получения более точной характеристики динамических свойств.

Вибрационные технологии используются при реализации технологических процессов широкой номенклатуры, в частности, при классификации деталей, перемещении сыпучих гранулированных сред, вибрационном упрочнении, уплотнении железобетонных изделий на стадии придания формы и др. [17, 18]. Эти производственные процессы осуществляются при помощи вибрационных технологических машин [19–21]. Для формирования устойчивых режимов их функционирования требуется разработка соответствующих конструктивно-технических решений, которые могут быть настроены в зависимости от конкретных условий эксплуатации с возможностями варьирования параметрами нескольких элементов как в совокупности, так и отдельным порядком, что дает широкие возможности изменения динамического состояния вибрационных технологических машин.

Цель исследования заключается в оценке возможностей корректировки параметров динамического состояния вибрационной технологической машины для формирования режимов вибрационного перемещения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка динамического состояния технических объектов различного назначения на начальном этапе предполагает создание расчетной схемы в виде механической колебательной системы с несколькими степенями свободы, к примеру системы с твердым телом, имеющим массу M и момент инерции J , совершающим движение по координатам U_1 и U_2 , находящимся на расстоянии l_1 и l_2 от

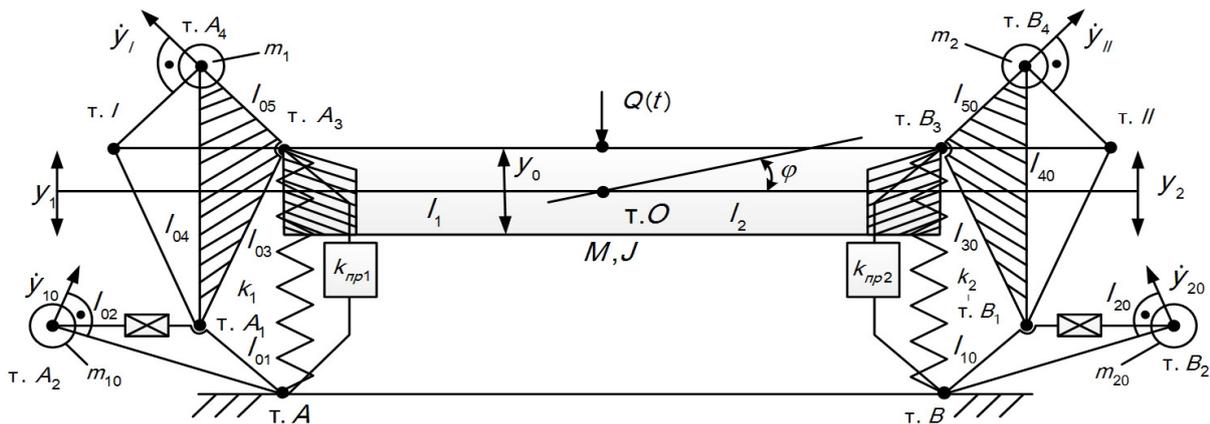


Рис. 1. Исходная расчетная схема исследуемого конструктивно-технического решения
Fig. 1. The initial calculation model of the structural and technical solution under investigation

центра рабочего органа. Вибрационная технологическая машина соединяется со сложными упругими опорами в точках A_3 и B_3 , которые, в свою очередь, связаны с опорной поверхностью в точках A и B . В структуре упругих опор также имеются шарнирные соединения A_1, A_2, A_4 и B_1, B_2, B_4 . Включение в систему дополнительных масс (m_1, m_2, m_{10}, m_{20}) осложняет оценку ее динамических свойств (рис. 1).

Также можно рассмотреть движение системы в координатах y_0, φ после учета следующих соотношений:

$$y_0 = ay_1 + by_2, \varphi = c(y_2 - y_1), y_1 = y_0 - l_1\varphi, y_2 = y_0 + l_2\varphi, \quad (1)$$

где $a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}, b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}, c = \frac{1}{l_1 + l_2}$.

Вибрационная машина имеет два сложных блока с упругими, рычажными и массоинерционными элементами в составе, изменение параметров которых дает возможность получения необходимых режимов работы

вибрационной технологической машины. В частности, можно отметить влияние на динамическое состояние технического объекта изменения передаточных отношений рычагов, входящих в состав дополнительных структур.

Учитывая сложный геометрический характер упруго-рычажных опор, с целью построения выражений для кинетической и потенциальной энергии системы необходимо воспользоваться понятием о мгновенных центрах скоростей при учете уравнения Лагранжа 2-го рода для получения информации о скоростях дополнительных масс m_1, m_2, m_{10} и m_{20} по координатам $\dot{y}_1, \dot{y}_{10}, \dot{y}_2, \dot{y}_{20}$. Детализированные расчетные схемы представлены на рис. 2, где приведены обозначения: $m_1 \rightarrow \dot{y}_1, m_2 \rightarrow \dot{y}_{11}, m_{10} \rightarrow \dot{y}_{10}, m_{20} \rightarrow \dot{y}_{20}$.

Выбор углов между рычажными связями ($\beta_1, \beta_2, \beta_3$ и $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$), а также длины рычагов $l_{01}, l_{02}, l_{03}, l_{04}, l_{10}, l_{20}, l_{30}, l_{40}$ производится в соответствии с выбранными конструктивно-техническими решениями.

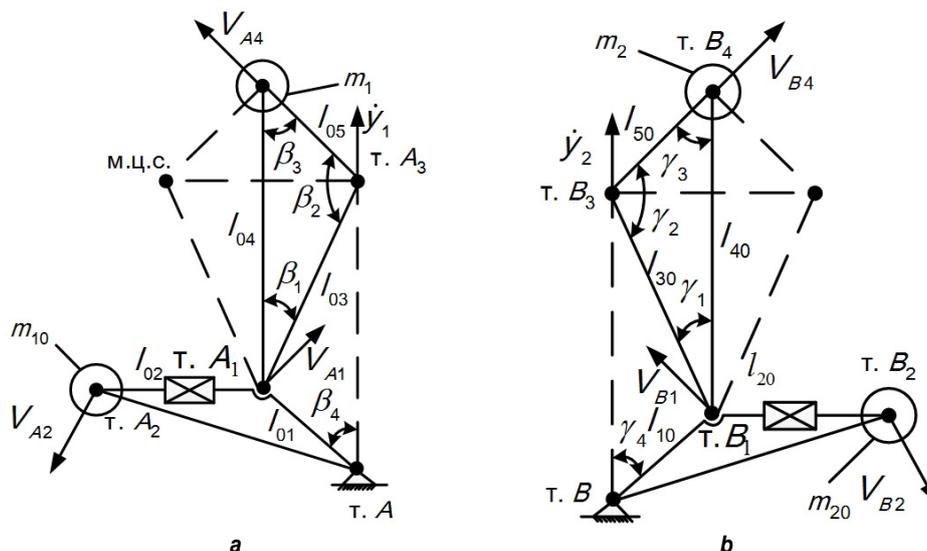


Рис. 2. Расчетные схемы для определения скоростей движения элементов
Fig. 2. Calculation models for determining velocities of element motions

Составленные расчетные схемы позволяют не только более точно определить геометрическую структуру дополнительных сложных обобщенных элементов, но также найти на их основе данные о скоростях движения элементов и конструктивно-технических решениях. Получим соотношения:

$$\dot{y}_1 = a_{01}\dot{y}_1, \dot{y}_{11} = b_{01}\dot{y}_2, \dot{y}_{10} = a_{10}\dot{y}_1, \dot{y}_{20} = b_{10}\dot{y}_2. \quad (2)$$

Использование дополнительных выкладок позволяет вывести выражение для кинетической энергии:

$$T = \frac{1}{2}M(a\dot{y}_1 + b\dot{y}_2)^2 + \frac{1}{2}Jc^2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^2 + \frac{1}{2}m_1a_1^2\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}m_2a_{11}^2\dot{y}_2^2 + \frac{1}{2}m_{10}a_{10}^2\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}m_{20}a_{20}^2\dot{y}_2^2. \quad (3)$$

Специфика составления формулы для потенциальной энергии заключается в наличии дополнительных сложных пневмоупругих структур с жесткостями k_{01} , k_{02} и k_{10} , k_{20} и демпферными элементами b_1 и b_2 . Выражение для приведенной жесткости k_{np1} в этом случае примет вид:

$$k_{np1} = \frac{k_{01}(k_{02} + b_1\rho)}{k_{01} + k_{02} + b_1\rho}. \quad (4)$$

Если $b_1 \rightarrow 0$, то

$$k_{np1} = \frac{k_{01}k_{02}}{k_{01} + k_{02}}. \quad (5)$$

При $b_1 \rightarrow \infty - k_{np1} = k_{01}$.

Приведенная жесткость второго обобщенного элемента отобразится выражением:

$$k_{np2} = \frac{k_{10}(k_{20} + b_2\rho)}{k_{10} + k_{20} + b_2\rho}. \quad (6)$$

С учетом (4) и (6) получим выражение для потенциальной энергии системы:

$$W = \frac{1}{2}(k_1 + k_{np1})y_1^2 + \frac{1}{2}(k_2 + k_{np2})y_2^2. \quad (7)$$

Элементы с приведенными жесткостями представляют собой пневмоупругие элементы, части которых соединены между собой при помощи управляемых дросселей для ограничения увеличения амплитуды в околорезонансных частотах. Из-за сложной структуры пневмоупругих элементов, содержащих два упругих и демпфирующий элементы, изменение их параметров сильно влияет на динамическое состояние вибрационной технологической машины.

Система дифференциальных уравнений движения с постоянными коэффициентами примет вид:

$$\ddot{y}_1(Ma^2 + Jc^2 + m_1a_1^2 + m_{10}a_{10}^2) + y_1(k_1 + k_{np1}) - \ddot{y}_2(Jc^2 - Mab) = Q(t)a, \quad (8)$$

$$\ddot{y}_2(Mb^2 + Jc^2 + m_2a_{11}^2 + m_{20}a_{20}^2) + y_2(k_2 + k_{np2}) - \ddot{y}_1(Jc^2 - Mab) = Q(t)b. \quad (9)$$

Для перехода к применению методологических позиций структурного математического моделирования исходная система уравнений после использования преобразований Лапласа [8] при нулевых начальных условиях в операторной форме примет вид:

$$\bar{y}_1(Ma^2 + Jc^2 + m_1a_1^2 + m_{10}a_{10}^2)p^2 + \bar{y}_1(k_1 + k_{np1}) - \bar{y}_2(Jc^2 - Mab)p^2 = \bar{Q}a; \quad (10)$$

$$\bar{y}_2(Mb^2 + Jc^2 + m_2a_{11}^2 + m_{20}a_{20}^2)p^2 + \bar{y}_2(k_2 + k_{np2}) - \bar{y}_1(Jc^2 - Mab)p^2 = \bar{Q}b, \quad (11)$$

где $p = j\omega$ – комплексная переменная ($j = \sqrt{-1}$), значок \leftrightarrow над переменной означает ее изображение по Лапласу [8].

Структурная схема системы представлена на рис. 3 [8].

Используя структурную схему (см. рис. 3), можно построить передаточные функции системы при заданном силовом возмущении Q , которые одновременно действуют на два входа системы: является частотным характеристическим уравнением системы:

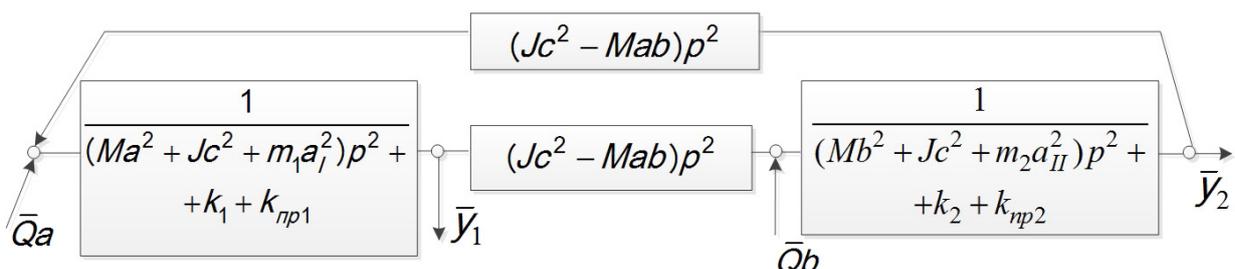


Рис. 3. Структурная математическая модель системы
Fig. 3. Structural mathematical model of the system

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{Q} = \frac{a \left[(Mb^2 + Jc^2 + m_2 a_{II}^2 + m_{20} a_{20}^2) p^2 + k_2 + k_{np2} \right] + b (Jc^2 - Mab) p^2}{A(p)}; \quad (12)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{Q} = \frac{b \left[(Ma^2 + Jc^2 + m_1 a_I^2 + m_{10} a_{10}^2) p^2 + k_1 + k_{np1} \right] - a (Jc^2 - Mab) p^2}{A(p)}, \quad (13)$$

$$A(p) = \left[(Ma^2 + Jc^2 + m_1 a_I^2 + m_{10} a_{10}^2) p^2 + k_1 + k_{np1} \right] \times \\ \times \left[(Mb^2 + Jc^2 + m_2 a_{II}^2 + m_{20} a_{20}^2) p^2 + k_2 + k_{np2} \right] - \left[(Jc^2 - Mab) p^2 \right]^2 \quad (14)$$

где

является частотным характеристическим уравнением системы.

Анализ структурной схемы и полученных на ее основе передаточных функций показывает наличие межпарциальной связи между двумя упруго-рычажными структурами, на которые опирается система, которая при соответствующих сочетаниях параметров может обнуляться. При возникновении такого режима движение координат происходит независимо друг от друга. В системе существуют две частоты собственных колебаний. Вместе с тем возможна реализация режимов динамического гашения колебаний, необходимая для создания соответствующего распределения амплитуд колебаний точек рабочего органа вибрационной технологической машины с целью формирования технологических режимов взаимодействия сыпучих сред с обрабатываемой деталью, а также для получения режимов вибрационного перемещения гранулированной рабочей среды для ее последующей классификации.

Для оценки динамического состояния исходного технического объекта можно использовать передаточную функцию межпарциальных связей, представляющую собой отношение передаточных функций по координатам y_1 и y_2 :

$$W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{b \left[(Ma^2 + Jc^2 + m_1 a_I^2 + m_{10} a_{10}^2) p^2 + k_1 + k_{np1} \right] - a (Jc^2 - Mab) p^2}{a \left[(Mb^2 + Jc^2 + m_2 a_{II}^2 + m_{20} a_{20}^2) p^2 + k_2 + k_{np2} \right] + b (Jc^2 - Mab) p^2}, \quad (15)$$

Передаточная функция (15) показывает связность движения координат \bar{y}_1 и \bar{y}_2 . При $W_{12}(p) = i = 1$ рабочий орган совершает только поступательные вертикальные вибрационные движения, то есть угловые колебания обнуляются. При условии, что центр масс является неподвижным ($y_0 = 0$), а $i = -1$, в системе наблюдаются только угловые колебания. Также возможна «трапецеидальная форма распределения амплитуд колебаний точек по длине рабочего органа ($i > 1$ $i < 1$). В этом

случае рабочий орган имеет так называемый центр колебаний, относительно совершаются угловые колебания. При динамическом гашении колебаний по координатам \bar{y}_1 или \bar{y}_2 узел колебаний совпадает с «обнуляющейся» координатой.

Наличие в структуре технического объекта, предназначенного для реализации режимов вибрационного перемещения дополнительных масс m_1 , m_2 , m_{10} и m_{20} и рычажных связей l_{10} , l_{20} и l_{01} , l_{02} , имеющих параметры передаточных отношений a , a_{II} , a_{10} , a_{20} , соответственно, позволяет осуществлять настройку режимов работы вибрационного технологического комплекса.

Также корректировка параметров динамического состояния вибрационной технологической машины может осуществляться за счет изменения значений составляющих элементов дополнительных приведенных блоков k_{np1} и k_{np2} , в структуре которых присутствуют как упругие элементы (пружины), так и демпферы, что при одновременном увеличении или уменьшении значений параметров ощутимо влияют на динамическое состояние системы.

Для иллюстрации возможностей изменения параметров вибрационного технологического комплекса приведены результаты численного моделирования в виде семейств

амплитудно-частотных характеристик. Для решения модельной задачи выбраны следующие параметры элементов системы:

$a = 0,4$; $b = 0,6$; $c = 1$; $a_I = 0,4$; $a_{II} = 0,6$; $a_{10} = 0,6$; $a_{20} = 0,4$; $M = 1000$ кг; $J = 400$ кг·м²; $m_1 = 150$ кг; $m_2 = 150$ кг; $m_{10} = 150$ кг; $m_{20} = 150$ кг; $k_1 = 900$ кН/м; $k_2 = 1100$ кН/м; $k_{10} = k_{20} = 300, 400, 500$ кН/м; $k_{01} = k_{02} = 300, 400, 500$ кН/м; $b_1 = 300, 400, 500$ Нс/м; $b_2 = 300, 400, 500$ Нс/м.

На основании передаточных функций отношения координат движения \bar{y}_1 и \bar{y}_2 , а

также их соотношения, представляющего собой межпарциальную связь, получен ряд графиков амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), показывающих возможности изменения динамического состояния рассматриваемой вибрационной технологической машины. Кривые имеют типовой вид и даны для иллюстрации возможностей вариации дополнительными параметрами системы. Приведено семейство амплитудно-частотных характеристик при изменении параметров элементов, входящих в k_{np} . Показано смещение АЧХ вправо относительно оси ординат при входном силовом воздействии (рис. 4). Выходной сиг-

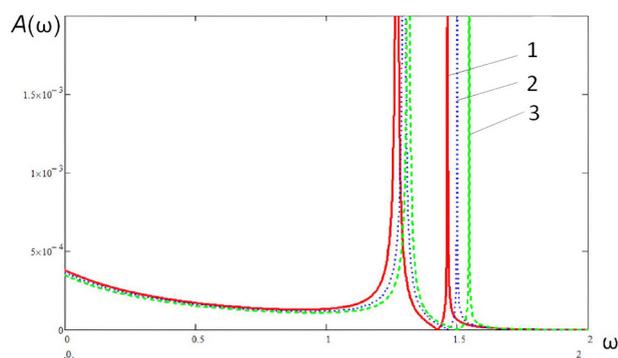


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики системы по координате y_1

- (1 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 300$ кН/м; $b_1 = b_2 = 300$ Н·с/м;
 2 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 400$ кН/м; $b_1 = b_2 = 400$ Н·с/м;
 3 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 500$ кН/м; $b_1 = b_2 = 500$ Н·с/м)

Fig. 4. Amplitude-frequency characteristics of the system along the y_1 coordinate

- (1 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 300$ кН/м; $b_1 = b_2 = 300$ Н·с/м;
 2 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 400$ кН/м; $b_1 = b_2 = 400$ Н·с/м;
 3 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 500$ кН/м; $b_1 = b_2 = 500$ Н·с/м)

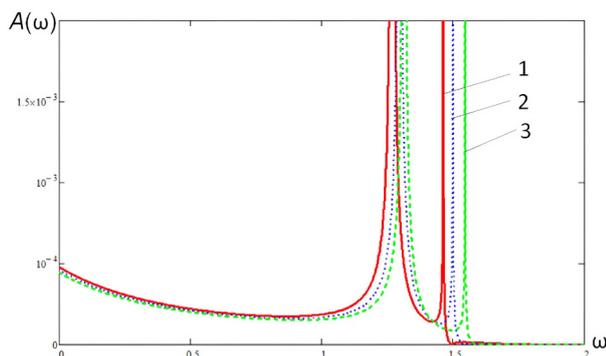


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики системы по координате y_2

- (1 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 300$ кН/м; $b_1 = b_2 = 300$ Н·с/м;
 2 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 400$ кН/м; $b_1 = b_2 = 400$ Н·с/м;
 3 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 500$ кН/м; $b_1 = b_2 = 500$ Н·с/м)

Fig. 5. Amplitude-frequency characteristics of the system along the y_2 coordinate

- (1 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 300$ кН/м; $b_1 = b_2 = 300$ Н·с/м;
 2 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 400$ кН/м; $b_1 = b_2 = 400$ Н·с/м;
 3 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 500$ кН/м; $b_1 = b_2 = 500$ Н·с/м)

нал в этом случае представлен смещением по координате y_1 .

На рис. 5 приведены кривые АЧХ по координате y_2 , где наблюдаются аналогичные координате y_1 динамические эффекты.

Амплитудно-частотные характеристики межпарциальных связей при тех же параметрах имеют один резонансный пик и одну частоту динамического гашения колебаний, как показано на рис. 6.

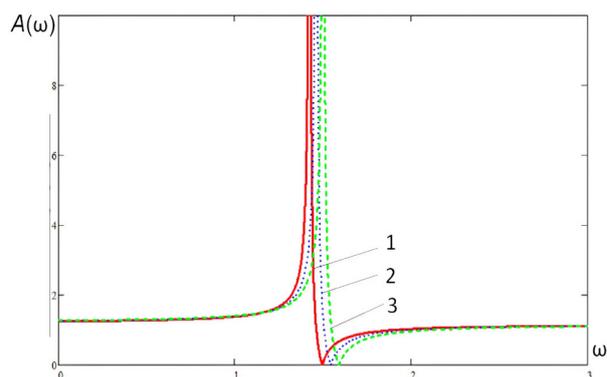


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики соотношения межпарциальных связей

- (1 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 300$ кН/м; $b_1 = b_2 = 300$ Н·с/м;
 2 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 400$ кН/м; $b_1 = b_2 = 400$ Н·с/м;
 3 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 500$ кН/м; $b_1 = b_2 = 500$ Н·с/м)

Fig. 6. Amplitude-frequency characteristics of the ratio of interpartial connections

- (1 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 300$ кН/м; $b_1 = b_2 = 300$ Н·с/м;
 2 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 400$ кН/м; $b_1 = b_2 = 400$ Н·с/м;
 3 - $k_{10} = k_{20} = k_{01} = k_{02} = 500$ кН/м; $b_1 = b_2 = 500$ Н·с/м)

Таким образом, в рассматриваемой системе большое количество дополнительных элементов дает широкие возможности для настройки и управления динамическим состоянием вибрационной машины при реализации режима виброперемещения. Следует отметить существенное влияние пневмоупругих структур, изменение приведенной жесткости которых осуществляется за счет управляемых дросселей. Численное моделирование проводилось в достаточно ограниченном диапазоне изменения параметров, что оставляет множество вариантов получения их сочетаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый подход позволяет получить математическую модель системы с учетом сложных дополнительных упругорычажных структур с большим количеством элементов, на которые опирается рабочий орган вибрационной технологической машины. Предложенное конструктивно-

техническое решение дает возможность формировать динамические режимы, необходимые для обработки деталей сложной формы при помощи технологической рабочей среды. На основании построенных передаточных функций можно оценить динамическое состояние вибрационной технологической машины и при необходимости произвести подбор параметров системы для формирования требуемых технологических режимов. Получение необходимых режимов работы вибрационной машины для

обеспечения движения рабочей среды связано с нужным соотношением координат ее крайних точек. Такая связность достигается за счет подбора параметров дополнительных элементов, в частности, блока дополнительных упругих и демпфирующих элементов, оказывающих большое влияние на общее состояние системы. Получены амплитудно-частотные характеристики по координатам движения в зависимости от силового воздействия, а также графики изменения межпарциальных связей в зависимости от частоты.

Список источников

1. Пановко Г.Я. Лекции по основам теории вибрационных машин и технологий. М.: МГТУ им. Баумана, 2008. 192 с.
2. Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Наука, 1994. 394 с.
3. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей в абразивной среде. М.: Машиностроение, 1968. 92 с.
4. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография. Воронеж: Научная книга, 2011. 569 с.
5. Елисеев С.В., Резник Ю.И., Хоменко А.П. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем. Новосибирск: Наука, 2011. 384 с.
6. Елисеев С.В., Резник Ю.И., Хоменко А.П., Засядко А.А. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов. Иркутск: ИГУ, 2008. 523 с.
7. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники. М.: Машиностроение, 1968. 362 с.
8. Елисеев С.В. Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование (динамика транспортных технологических машин: связность движений, вибрационные взаимодействия, рычажные связи). Иркутск: ИРГУПС, 2018. 692 с.
9. Большаков Р.С. Особенности вибрационных состояний транспортных и технологических машин. Динамические реакции и формы взаимодействия элементов: монография. Новосибирск: Наука, 2020. 411 с.
10. Елисеев А.В., Сельвинский В.В., Елисеев С.В. Динамика вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учетом неудерживающих связей: монография. Новосибирск: Наука, 2015. 331 с.
11. Eliseev S.V., Eliseev A.V. Theory of oscillations // Structural Mathematical Modeling in Problems of Dynamics of Technical Objects. Cham: Springer, 2019. Vol. 252. 521 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-31295-4>.
12. Елисеев С.В., Елисеев А.В., Большаков Р.С., Хоменко А.П. Методология системного анализа в задачах оценки, формирования и управления динамическим состоянием технологических и транспортных машин: монография. Новосибирск: Наука, 2021. 681 с.
13. Eliseev S.V., Bolshakov R.S., Orlenko A.I., Trofimov A.N. Structural mathematical modelling: the concept of feedback in the dynamics of mechanical oscillation systems // XII International Scientific and Technical Conference «Applied Mechanics and Systems Dynamics»: electronic publication (Omsk, 13–15 November 2018). Omsk: IOP Publishing Ltd, 2018. P. 012036.
14. Bolshakov R.S., Sitov I.S. The estimation of dynamical condition of vibration technological machines at joint action of two external disturbances // Modeling of technical systems. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 971. Iss. 4. P. 042007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/4/042007>.
15. Eliseev S.V., Kargapoltsev S.K., Bolshakov R.S., Kuznetsov N.K. The dynamical condition of the vibration machine: Nodes of oscillations, flexural centers, connectivity parameters // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 709. Iss. 4. P. 044004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044004>.
16. Bolshakov R.S., Sitov I.S., Eliseev S.V. Unilateral constraints in interactions of system elements: estimation of dynamic constraint reactions // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov. Cham: Springer, 2021. P. 851–860. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_98.
17. Вайсберг Л.А., Рубисов Л.Г. Вибрационное грохочение сыпучих материалов: моделирование процессов и технологический расчет грохотов. СПб.: Механобртехника, 1994. 47 с. EDN: VNOBPZ.
18. Eliseev A.V., Kuznetsov N.K., Eliseev S.V. Features of vibration machines with the introduction of additional links in the form of lever mechanisms // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov. Cham: Springer, 2021. P. 814–822. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_94. EDN: BUPBZT.
19. Eliseev S., Eliseev A., Kuznetsov N. System representations of dynamics of mechanical oscillatory structures based on

frequency function and damping function // *Electromechanics and Robotics. Smart Innovation, Systems and Technologies* / eds. A. Ronzhin, V. Shishlakov. Singapore: Springer, 2022. Vol. 232. P. 335–347. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_29.

20. Eliseev A.V., Kuznetsov N.K., Eliseev S.V., Vuong Q.T. Influence of inertial links on the distribution of vibration amplitudes of points of the working body of a technological vibrating // *International Conference Aviation Engineering and Transportation. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021. Vol. 1061. Iss. 1. P. 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1061/1/012013>.

21. Пат. № 2773825, Российская Федерация, С1, В06В1/14, В24В31/00. Устройство для формирования вибрационного перемещения рабочей среды / С.В. Елисеев, С.К. Каргапольцев, Р.С. Большаков, А.В. Елисеев, К.Ч. Вьонг, А.С. Миронов, А.В. Николаев; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный университет путей сообщения. № 2021102615. Заявл. 04.02.2021; опубл. 10.06.2022.

References

1. Panovko G.Ya. *Lectures on the basics of the theory of vibration machines and technologies*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University; 2008, 192 p. (In Russ.).
2. Blekhman I.I. *Vibrational mechanics*. Moscow: Nauka; 1994, 394 p. (In Russ.).
3. Babichev A.P. *Vibration processing of parts in an abrasive medium*. Moscow: Mashinostroenie; 1968, 92 p. (In Russ.).
4. Kopylov Yu.R. *Dynamics of vibration shock hardening processes: monographs*. Voronezh: Nauchnaya kniga; 2011, 569 p. (In Russ.).
5. Eliseev S.V., Reznik Yu.I., Khomenko A.P. *Mechatronic approaches in mechanical oscillatory system dynamics*. Novosibirsk: Nauka; 2011, 384 p. (In Russ.).
6. Eliseev S.V., Reznik Yu.N., Khomenko A.P., Zasyadko A.A. *Dynamic synthesis in generalized problems of vibration protection and vibration isolation of technical objects*. Irkutsk: Irkutsk State University; 2008, 523 p. (In Russ.).
7. Bykhovskiy I.I. *Fundamentals of the theory of vibration technology*. Moscow: Mashinostroenie; 1968, 362 p. (In Russ.).
8. Eliseev S.V. *Applied system analysis and structural mathematical modeling (dynamics of transport technological machines: motion connectivity, vibrational interactions, linkages)*. Irkutsk: Irkutsk State Transport University; 2018, 692 p. (In Russ.).
9. Bolshakov R.S. *Vibrational state features of transport and technological machines. Dynamic reactions and forms of element interactions: monograph*. Novosibirsk: Nauka; 2020, 411 p. (In Russ.).
10. Eliseev A.V., Selvinsky V.V., Eliseev S.V. *Dynamics of vibrational interactions of technological system elements considering unilateral constraints: monograph*. Novosibirsk: Nauka; 2015, 332 p. (In Russ.).
11. Eliseev S.V., Eliseev A.V. Theory of oscillations. In: *Structural mathematical modeling in problems of dynamics of technical objects*. Cham: Springer; 2019, vol. 252, 521 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-31295-4>.
12. Eliseev S.V., Eliseev A.V., Bolshakov R.S., Khomenko A.P. *System analysis methodology in the problems of estimation, formation and control of the dynamic state of technological and transport machines: monograph*. Novosibirsk: Nauka; 2021, 681 p. (In Russ.).
13. Eliseev S.V., Bolshakov R.S., Orlenko A.I., Trofimov A.N. Structural mathematical modelling: the concept of feedback in the dynamics of mechanical oscillation systems. In: *XII International Scientific and Technical Conference «Applied Mechanics and Systems Dynamics»: electronic publication*. 13–15 November 2018, Omsk. Omsk: IOP Publishing Ltd; 2018, p. 012036.
14. Bolshakov R.S., Sitov I.S. The estimation of dynamical condition of vibration technological machines at joint action of two external disturbances. In: *Modeling of technical systems. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;971(4):042007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/4/042007>.
15. Eliseev S.V., Kargapoltsev S.K., Bolshakov R.S., Kuznetsov N.K. The dynamical condition of the vibration machine: Nodes of oscillations, flexural centers, connectivity parameters. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;709(4):044004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044004>.
16. Bolshakov R.S., Sitov I.S., Eliseev S.V. Unilateral constraints in interactions of system elements: estimation of dynamic constraint reactions. In: Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds.). *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer; 2021, p. 851-860. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_98.
17. Vaisberg L.A., Rubisov L.G. *Vibratory screening of bulk materials: process modeling and technological calculation of screens*. St. Petersburg: Mechanobr-technika; 1994, 47 p. (In Russ.). EDN: VNOBPZ.
18. Eliseev A.V., Kuznetsov N.K., Eliseev S.V. Features of vibration machines with the introduction of additional links in the form of lever mechanisms. In: Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds.). *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer; 2021, p. 814-822. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_94. EDN: BUPBZT.
19. Eliseev S., Eliseev A., Kuznetsov N. System representations of dynamics of mechanical oscillatory structures based

on frequency function and damping function. In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds.). *Electromechanics and Robotics. Smart Innovation, Systems and Technologies*. Singapore: Springer; 2022, vol. 232, p. 335-347. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_29.

20. Eliseev A.V., Kuznetsov N.K., Eliseev S.V., Vuong Q.T. Influence of inertial links on the distribution of vibration amplitudes of points of the working body of a technological vibrating. In: *International Conference Aviation Engineering and Transportation. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021;1061(1):012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1061/1/012013>.

21. Eliseev S.V., Kargapol'tsev S.K., Bolshakov R.S., Elisev A.V., Vyong K.C., Mironov A.S., Nikolaev A.V. *Device for forming vibrational displacement of the working medium*. Patent RF, no. 2773825; 2022. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Большаков Роман Сергеевич,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры управления
эксплуатационной работой,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
✉ bolshakov_rs@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1187-5932>

Каргапольцев Сергей Константинович,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры технологии и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
kck6262@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4601-3099>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 19.06.2023 г.;
одобрена после рецензирования 16.10.2023 г.;
принята к публикации 08.11.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Roman S. Bolshakov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Operational
Management Department,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia
✉ bolshakov_rs@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1187-5932>

Sergey K. Kargapol'tsev,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Technology and
Equipment of Mechanical Engineering Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
kck6262@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4601-3099>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 19.06.2023;
approved after reviewing 16.10.2023;
accepted for publication 08.11.2023.



Научная статья
УДК 629.91.01
EDN: KHEWIQ
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-645-654

Расчёт силовых параметров процесса формообразования заготовок концевыми фрезами

М.А. Леквеишвили^{1✉}, А.Б. Люхтер², Н.Н. Давыдов³

¹⁻³Научно-образовательный центр внедрения лазерных технологий Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

Резюме. Цель – создание и апробация оперативной методики расчета силовых параметров и характеристик инструмента и процесса фрезерования конструкционных материалов концевыми фрезами. При разработке методики предварительного расчета суммарной осевой силы, действующей на режущей кромке концевых фрез, использованы структурные схемы механообработки и силовые модели процессов косоугольного резания в режимах осевой подачи инструмента и непрерывного пластического деформирования обрабатываемого материала. Опыты с вращающимся инструментом проведены на 3-осевом обрабатывающем центре UWF 1202 Н фирмы «Hermle», дополненном пьезоэлектрическим динамометром фирмы «Kistler» (модель 9272). Предложена, разработана и апробирована методика предварительного расчета силовых характеристик процесса механической обработки заготовок концевыми фрезами, учитывающая влияние величины энергетической мощности вязкого разрушения обрабатываемого материала. Обусловлено, что контактное трение, возникающее на передней и задней поверхностях режущего инструмента, не достигает предельной величины и подчиняется закону Кулона-Амонтона, то есть оценивается зависимостью прямо пропорциональной нормальному давлению. В результате выполненных вычислений предопределены материалы заготовки для фрезерной обработки – сталь 45 (AISI 1045), и концевой двузубой фрезы – сплав Т14К8 без покрытия, из которого были изготовлены опытные образцы. Установлены режимы фрезерной обработки: глубина засверливания – 4 мм; скорости резания – 50, 100 и 150 м/мин; подача режущего инструмента – 0,05 и 0,1 мм/об. Выявлено, что отклонение измеренных значений осевой силы резания от расчетных в диапазоне изменения значений скорости подачи инструмента составляет не более 11%, а в диапазоне изменения значений скорости резания не более 15%. Разработанная расчетно-аналитическая методика оценки силовых параметров процесса формообразования заготовок концевыми фрезами обеспечивает повышение оперативности и достоверности предварительного прогностического расчета рабочих параметров и характеристик режущих элементов концевых фрез.

Ключевые слова: фрезерная обработка, концевые фрезы, косоугольное резание, деформационное упрочнение, Кулоново трение, удельная работа разрушения

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2020-0015, госзадание ВлГУ).

Для цитирования: Леквеишвили М.А., Люхтер А.Б., Давыдов Н.Н. Расчёт силовых параметров процесса формообразования заготовок концевыми фрезами // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 645–654. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-645-654>. EDN: KHEWIQ.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Calculation of force parameters of workpiece machining process with end mill cutters

Maria A. Lekveishvili^{1✉}, Alexander B. Lyukhter², Nikolay N. Davydov³

¹⁻³Research and Educational Center for Laser Technology Implementation of Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

Abstract. The aim is to develop and validate an operational methodology for calculating the force parameters and characteristics of the tool and the process of milling structural materials with end milling cutters. The structural schemes of

© Леквеишвили М.А., Люхтер А.Б., Давыдов Н.Н., 2023

machining and force models of oblique cutting processes in the modes of axial tool feed and continuous plastic deformation of the processed material were used when developing the method of preliminary calculation of the total axial force working on the cutting edge of end milling cutters. The rotating tool tests were conducted on a Hermle UWF 1202 H 3-axis machining center supplemented with a Kistler piezoelectric dynamometer (model 9272). Authors suggested, developed and tested the preliminary calculation method applied to the force characteristics of the machining process of workpieces by end milling cutters, considering how the energy power of ductile fracture of the machined material affects the process. Contact friction arising on the front and rear surfaces of the cutting tool does not reach the limiting value being subject to the Coulomb – Amontons law, that is, it is estimated by the dependence directly proportional to the normal pressure. After calculations, we defined the materials of the workpiece for milling, that is 45 steel (AISI 1045), and the end two-tooth cutter, uncoated T14K8 alloy, which was used to produce samples. The following milling modes were established: 4 mm boring depth; 50, 100 and 150 m/min cutting speeds; 0.05 and 0.1 mm/rev cutting tool feed. Deviation of the measured values of axial cutting force from the calculated values in the range of changing values of tool feed rate was found to be no more than 11%, and in the range of changing values of cutting speed no more than 15%. The developed calculation and analytical methodology for estimating force parameters of the machining process by end milling cutters provides an increase in the efficiency and reliability of the preliminary prognostic calculation of operating parameters and characteristics of cutting elements of end milling cutters.

Keywords: milling, end mills, oblique cutting, strain hardening, Coulomb friction, specific work of fracture

Funding: The research was carried out under the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUN-2020-0015, state assignment of Vladimir State University).

For citation: Lekveishvili M.A., Lyukhter A.B., Davydov N.N. Calculation of force parameters of workpiece machining process with end mill cutters. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):645-654. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-645-654>. EDN: KHEWIQ.

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование силовых параметров фрезерования концевыми фрезами имеет важное значение для повышения точности обработки изделий на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). Эти знания обеспечивают возможность получения более достоверной информации о предполагаемом износе инструмента и возможной его поломке. Увеличить срок службы инструмента и повысить качество обрабатываемой поверхности возможно за счет выбора оптимальных режимов резания и углов режущей кромки фрезы⁴.

Известно, что основу методологии моделирования процесса резания составляют [1]:

- эмпирический метод;
- аналитический метод;
- метод конечных элементов.

Для прогнозирования силовых параметров фрезерования концевыми фрезами ряд авторов используют эмпирический метод. В данном случае параметры фрезерования зависят от удельных коэффициентов резания, которые, по сути, учитывают влияние на результаты прогнозирования физико-механических свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров инструмента и режимов резания. При этом удельные коэффициенты резания определяются, как правило, экспериментально [2–7].

Эмпирическое моделирование, построенное на результатах экспериментальных исследований, является универсальным, так

как обеспечивает возможность учета конструкторско-технологических факторов, влияющих на процесс резания. Однако увеличение числа изучаемых факторов приводит к возрастанию объема экспериментальных работ. При этом модели адекватны лишь при изучении технических, технологических и конструкционных параметров в ограниченном диапазоне их значений, в котором проводились экспериментальные исследования [8].

Применение метода конечных элементов зачастую невозможно из-за отсутствия реологических моделей обрабатываемых материалов, описывающих как деформационное и скоростное упрочнение, так и разупрочнение, обусловленное температурным фактором. Кроме того, разработчикам инструмента в ряде случаев недоступна информация об адекватных моделях контактного трения и критериях разрушения материала. При этом достоверность результатов расчета при использовании данного метода зависит как от оперативности обработки данных, так и от вычислительной мощности информационно-технологического оборудования [1, 9].

Существенному повышению достоверности расчета силовых характеристик резания способствуют теоретико-аналитические модели, основанные на применении метода физико-математического моделирования процессов пластического деформирования. Использование таких моделей обеспечивает возможность оперативного прогнозирования

⁴ Sandvik Coromant (Firm). Modern metal cutting: a practical handbook. Sandvik Coromant, 1997.

как силы, температуры и мощности резания, так и оптимальных условий и режимов обработки, в том числе геометрических параметров и характеристик режущей кромки фрезы с учетом их влияния на ход процесса резания [10, 11]. Создание подобных моделей является актуальной научно-практической задачей.

При реализации аналитического метода расчета силовых параметров фрезерования концевыми фрезами разработчиками, как правило, выделяются (идентифицируются) на режущей кромке бесконечно малые режущие элементы. Считается, что каждый подобный режущий элемент осуществляет обработку поверхности материала в условиях косоугольного резания [12]. Расчет силовых параметров резания в этом случае ведется на основе математического аппарата, созданного в результате анализа закономерностей физико-механического деформирования поверхности [13–16]. Однако в этих работах не учитывается параметр мощности вязкого разрушения материала, связанный с протеканием процесса формообразования новых поверхностей [17, 18].

В данной работе для расчета силовых параметров резания концевыми фрезами при осевой подаче за основу взята модель косоугольного резания, предложенная Л.Д. Олениным [19, 20]. Модель описывает общий случай резания с углом наклона главной режущей кромки. Процесс резания рассматривается как процесс непрерывной пластической деформации. При расчете учитывается мощность вязкого разрушения, связанная с образованием двух новых поверхностей в плоскости резания. Кроме того, учитывается трение на передней и задней поверхностях режущего инструмента. Расчет выполнен энергетическим методом [21, 22]. В работе принято, что мощность, подводимая в зону резания, расходуется на пластическое деформирование в плоскости сдвига, преодоление сил трения на передней и задней поверхностях инструмента, а также на вязкое разрушение, связанное с образованием новых поверхностей.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

При обработке концевой фрезой с осевой подачей инструмента основная нагрузка приходится на зубья, расположенные на торцевой части фрезы. Схема обработки двузубой фрезой с осевой подачей приведена на рис. 1.

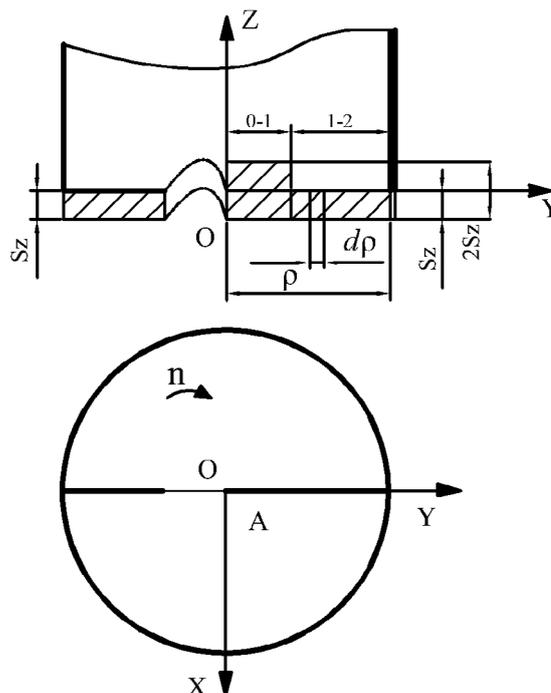


Рис. 1. Схема работы концевой фрезы с осевой подачей
Fig. 1. Operation diagram of an axial feed end mill

Для определения силовых параметров фрезерования на режущих кромках выделяются бесконечно малые режущие элементы (см. рис. 1), где dp – длина каждого режущего элемента.

Режущая кромка, доходящая до центра фрезы, на участке 0–1 удаляет срезаемый слой, который рассчитывается по зависимости (1):

$$df_{11}(p) = 2S_z \cdot dp, \quad (1)$$

где $df_{11}(p)$ – сечение срезаемого слоя на участке 0–1, мм²; S_z – подача на зуб, мм/зуб.

Сечение срезаемого слоя на участке 1–2 определяется из уравнения (2):

$$df_{12}(p) = S_z \cdot dp, \quad (2)$$

где $df_{12}(p)$ – сечение срезаемого слоя на участке 1–2, мм².

Срезаемый слой, который удаляет режущая кромка, не доходящая до центра фрезы, $df_{13}(p)$, мм², определяется в соответствии с уравнением (2).

Кинематический передний угол режущего элемента на торце фрезы в любой точке режущей кромки равен (3):

$$\gamma_T = \gamma_{T0} + \frac{S_o}{2 \cdot \pi \cdot \rho}, \quad (3)$$

где γ_T – передний торцовый угол кинематический, градусы; γ_{T0} – передний торцовый угол инструментальный, градусы; S_o – подача на оборот, мм/обр; ρ – радиус инструмента, мм.

Элементарные осевые силы, действующие на режущую кромку, доходящую до центра фрезы, на участках 0–1 и 1–2 рассчитываются из уравнений (4):

$$dP_{z1}(\rho) = q_{z1}(\rho) \cdot df_{11}(\rho) \cdot \sigma_b + q_{n3} \cdot \sigma_b \cdot df_{n3}(\rho) \cdot \mu;$$

$$dP_{z2}(\rho) = q_{z1}(\rho) \cdot df_{12}(\rho) \cdot \sigma_b + q_{n3} \cdot \sigma_b \cdot df_{n3}(\rho) \cdot \mu, (4)$$

где dP_{z1} – элементарная осевая сила, действующая на бесконечно малый режущий элемент на участке 0–1, Н; q_{z1} – давление резания, подводимое через переднюю поверхность; σ_b – предел прочности обрабатываемого материала, МПа; q_{n3} – нормальное давление, действующее на заднюю поверхность инструмента; df_{n3} – площадка износа по поверхности контакта инструмента с обработанной поверхностью, мм²; μ – коэффициент трения; dP_{z2} – элементарная осевая сила, действующая на бесконечно малый режущий элемент на участке 1–2, Н.

Элементарная осевая сила, действующая на бесконечно малый режущий элемент кромки, не доходящей до центра фрезы, dP_{z3} , Н, определяется по аналогии с уравнением (4).

Зависимости для расчета давления резания, подводимого через переднюю поверхность на выделенном участке зуба, и нормального давления на задней поверхности режущего инструмента приведены в работах [19, 20, 22].

Для расчета давления резания, подводимого через переднюю поверхность, q_{z1} необходимо предварительно установить значение относительной скорости схода стружки ζ . Следует отметить, что относительная скорость схода стружки ζ обратно пропорциональна усадке стружки ξ [19] (5):

$$\zeta = \frac{1}{\xi}. \quad (5)$$

Существенно, что в данной работе относительная скорость схода стружки ζ определяется расчетным методом, исходя из условия минимума мощности резания, подводимой через переднюю поверхность.

Суммарные осевые силы P_{z1} , Н и P_{z2} , Н, действующие на участках 0–1 и 1–2 режущей кромки, доходящей до центра фрезы, рассчитываются из уравнений (6):

$$P_{z1} = - \int_{R_0}^{R1} P_{z1}(\rho) \cdot d\rho ;$$

$$P_{z2} = - \int_{R1}^{R2} P_{z2}(\rho) \cdot d\rho \cdot \quad (6)$$

Суммарная осевая сила, действующая на режущей кромке, не доходящей до центра фрезы, P_{z3} , Н, определяется по аналогии с уравнением (6).



Рис. 2. Экспериментальная установка для исследования процесса резания вращающимся инструментом
Fig. 2. Experimental setup to study the cutting process with a rotating tool

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Силовые параметры фрезерования, рассчитанные по предложенной методике, сравнивались с данными эксперимента. При этом проведены экспериментальные исследования процесса резания вращающимся инструментом. В качестве оборудования использовался 3-осевой обрабатывающий центр фирмы «Heimle» модели UWF 1202 H. Обработка велась без применения смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС). Измерительная установка показана на рис. 2. Для измерения сил применялся пьезоэлектрический динамометр фирмы «Kistler» модели 9272. На динамометр устанавливалась заготовка в патроне, а режущий инструмент закреплялся в патроне станка. При вращении концевой фрезы и перемещении ее относительно заготовки с осевой подачей выполнялся процесс засверливания с заданной глубиной, который сопровождался регистрацией силы резания.

В процессе информационно-технологической регистрации измеряемых параметров сигнал с выхода динамометра поступал на вход высокочастотного усилителя «Kistler» модели 5070A, затем преобразовывался в аналого-числовой в устройстве BNC-210. Далее сигнал поступал на измерительную карту сбора данных National Instrument модели NI USB-6259 BNC. При обработке числовых значений из базы экспериментальных данных использовались средства программного обеспечения LabView.

Осевая глубина резания t во всех экспериментальных исследованиях была постоянной – 4 мм. Скорость резания V изменялась, и ее значения составили 50, 100 и 150 м/мин. Величины подачи инструмента S_o были равны 0,05 и 0,1 мм/об.

В качестве материала заготовки выбрана известная конструкционная сталь марки 45. Физико-механические характеристики стали 45 приведены в табл. 1.

Для экспериментальных исследований изготовлена специальная двузубая фреза из

Таблица 1. Физико-механические свойства стали 45
Table 1. Stress-strain properties of steel 45

Твердость НВ	Удельная работа распространения трещины a_p , кДж/м ²	Предел прочности обрабатываемого материала σ_b , МПа
162–169	109,4	540

⁶Кожевников Д.В., Гречишников А.В., Кирсанов С.В., Кокарев В.И., Схиртладзе А.Г. Режущий инструмент: учебник. М.: Машиностроение, 2007. 538 с.

твердого сплава марки Т14К8 без покрытия в количестве 5 штук. Наличие двух канавок позволило увеличить пространство для отвода стружки, что предотвратило инструмент от поломки. Зубья на винтовой и торцовой режущих частях выполнены остроконечными с усиленной формой зуба. Такая форма характеризуется ломаной спинкой. Зубья с усиленной формой имеют увеличенную прочность по отношению, например, к зубьям с параболической формой⁶. На рис. 3 приведен пример формы зуба на винтовой режущей части со значениями соответствующих углов. Характеристики фрезы представлены в табл. 2.

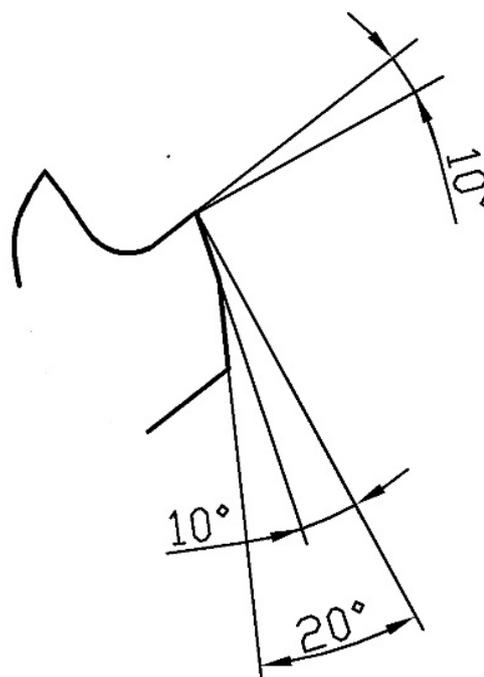


Рис. 3. Форма зуба на винтовой режущей части фрезы, применяемой в экспериментальных исследованиях
Fig. 3. Tooth shape on the helical cutting part of the milling cutter used in experimental studies

Кратность выполнения экспериментальных исследований при каждом сочетании значений скорости резания и подачи инструмента составила 3. Экспериментальная осевая сила, с которой сравнивалось расчетное значение, определена как усредненное значение по трем проходкам. Для обработки экспериментальных значений из всего массива данных выбира-

Таблица 2. Геометрические параметры фрезы
Table 2. Cutter geometric parameters

Наименование	Параметры
Диаметр D , мм	14
Угол наклона винтовой канавки ω °	30
Передний угол на винтовой режущей части γ_B °	10
Передний угол на торцовой режущей части γ_T °	5
Задние углы на винтовой режущей части α_{B1} °, α_{B2} °	10, 20
Задние углы на торцовой режущей части α_{T1} °, α_{T2} °	8, 16

лась область с установившимся сигналом. Значения сил, полученные по каждому из трех проходов, приведены в табл. 3.

Для контроля износа инструмента использовалась лупа с восьмикратным увеличением фирмы «Sandvik» (Art. – Nr. 4233). Эксперименты и последующая обработка полученных данных выполнены на аттестованном и лицензионном контрольно-измерительном и вычислительном оборудовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эпюра изменения измерительного сигнала приведена на рис. 4.

Характер экспериментальной эпюры осевой силы при фрезеровании совпадает с эпюрой, полученной авторами работы [23].

На рис. 5 представлены зависимости значений осевых сил от подачи на оборот, полученных экспериментально и расчетным путем.

В результате экспериментальных исследований установлено, что с увеличением подачи инструмента величина осевой силы возрастает прямо пропорционально изменению параметра подачи. Подобным же образом изменяется осевая сила, вычисленная расчетным методом. Это объясняется тем, что по мере роста величины подачи

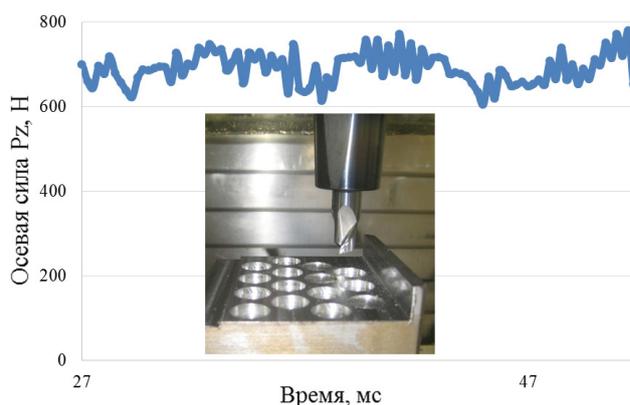


Рис. 4. Осциллограмма осевой силы при засверливании: материал сталь 45, скорость резания 100 м/мин, подача 0,05 мм/об, глубина резания 4 мм

Fig. 4. Axial force waveform under spotting: material – steel 45, cutting speed – 100 m/min, feed – 0.05 mm/rev, cutting depth – 4 mm

инструмента возрастает объем удаляемого материала в единицу времени.

Это приводит к повышению производительности резания, однако предопределяет рост сил. Результаты выполненных исследований подтверждаются закономерностями, изложенными Н.Н. Зоревым в работе [24]. Наибольшее отклонение между расчетными и экспериментальными значениями осевых сил резания не превышает 11%.

На рис. 6 приведена зависимость экспериментальных и расчетных осевых сил от скорости резания. Значение осевой силы, полученной экспериментально, уменьшается с увеличением скорости резания от

Таблица 3. Значения экспериментальных сил
Table 3. Values of experimental forces

Скорость резания V , м/мин	Глубина резания t , мм	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Значения осевой силы по проходам P_z , Н			
			Проход 1	Проход 2	Проход 3	Среднее значение
100	4	0,025	748	739	752	746
		0,05	898	912	922	911
150		0,025	652	649	632	644

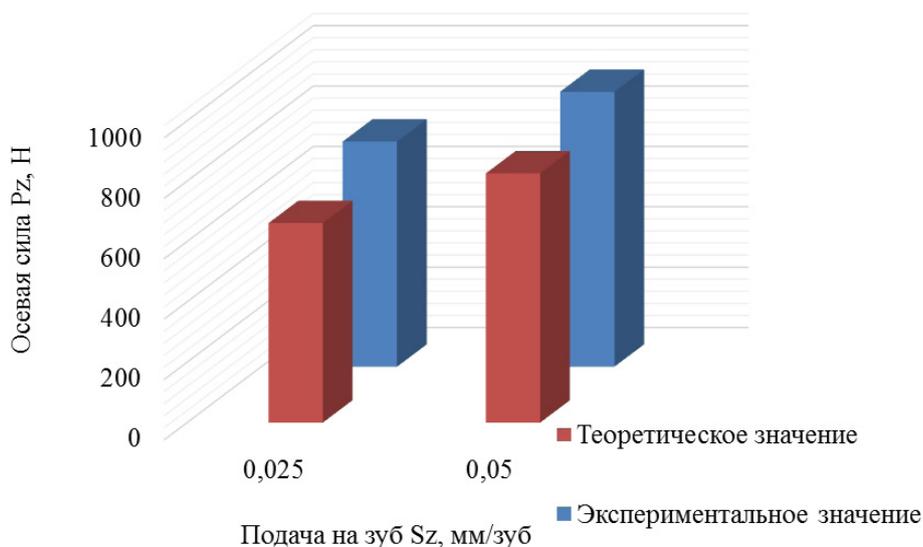


Рис. 5. Зависимость экспериментальных и расчетных значений осевых сил от подачи на зуб при засверливании: материал – сталь 45, скорость резания – 100 м/мин и глубина резания – 4 мм

Fig. 5. Dependence of experimental and theoretical values of axial forces on feed per tooth at drilling: material – steel 45 (AISI 1045), cutting speed – 100 m/min, cutting depth – 4 mm

100 м/мин до 150 м/мин. Объяснить такое явление возможно тем, что с увеличением скорости резания, как правило, повышается температура на передней и задней поверхностях режущего инструмента. Данный процесс оказывает разупрочняющее влияние на обра-

батываемый и инструментальный материалы⁶.

Из рис. 6 следует, что расчетное значение осевой силы остается постоянным при повышении скорости резания, так как методика расчета силовых параметров фрезерования

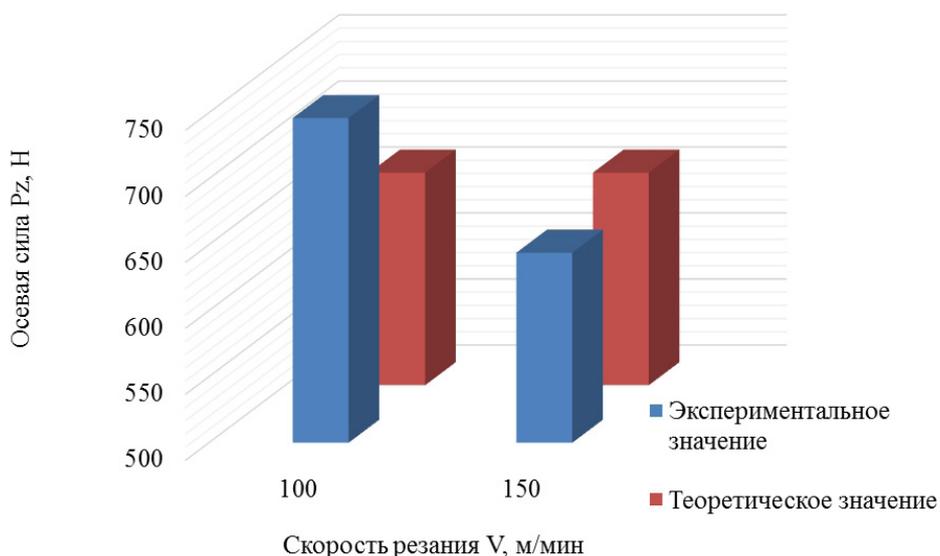


Рис. 6. Зависимость экспериментальных и теоретических осевых сил от скорости резания при засверливании концевой фрезой: сталь – 45, подача – 0,025 мм/зуб и глубина резания – 4 мм

Fig. 6. Dependence of experimental and theoretical axial forces on cutting speed at end mill drilling: material – steel 45, feed – 0.025 mm/tooth, cutting depth – 4 mm

⁶Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учебник. М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2001. 448 с.

концевыми фрезами не предполагает исследование влияния скорости резания на процесс стружкообразования. Наибольшее отклонение между расчетными и экспериментальными значениями при изменении скорости резания не превышает 15%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена методика расчета силовых параметров фрезерования, предназначенная для прогнозирования сил, возникающих в зоне обработки концевыми фрезами с осевой подачей. Методика базируется на модели косоугольного резания, предложенной Л.Д. Олениным. Анализ выполнен энергетическим методом в терминах мощности с учетом экстремальных положений механики сплошной среды.

При расчете учитываются изменение кинематических углов в любой точке режущей

кромки и изменение величины деформации при стружкообразовании, в том числе изменение силовых параметров в любой точке режущей кромки. Кроме того, берется во внимание мощность вязкого разрушения, связанная с образованием двух новых поверхностей в плоскости резания.

При сопоставлении расчетных значений осевой силы с экспериментальными данными для стали 45 получены адекватные результаты. Наибольшее отклонение между расчетными и экспериментальными значениями при изменении подачи не превысило 11%, а при изменении скорости резания – 15%.

Условием дальнейшего совершенствования предлагаемой методики расчета силовых характеристик фрезерования концевыми фрезами является учет влияния температурно-скоростного фактора на процесс стружкообразования.

Список источников

1. Jawahir I.S., Schoop J., Kaynak Y., Balaji A.K., Ghosh R., Lu T. Progress toward modeling and optimization of sustainable machining processes // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020. Vol. 142. Iss. 11. P. 110811. <https://doi.org/10.1115/1.4047926>.
2. Aslantas K., Ülker S., Şahan Ö., Pimenov D.Y., Giasin K. Mechanistic modeling of cutting forces in high-speed microturning of titanium alloy with consideration of nose radius // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 119. P. 2393–2408. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08437-w>.
3. Sim Choonggun, Yang Minyang. The prediction of cutting force in ball end milling // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1993. Vol. 33. Iss. 2. P. 267–284. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(93\)90079-a](https://doi.org/10.1016/0890-6955(93)90079-a).
4. Budak E., Altıntaş Y., Armarego E.J.A. Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1996. Vol. 118. Iss. 2. P. 216–224. <https://doi.org/10.1115/1.2831014>.
5. Engin S., Altintas Y. Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part I: helical end mills // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2001. Vol. 41. Iss. 15. P. 2195–2212. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00045-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00045-1).
6. Lee P., Altıntaş Y. Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1996. Vol. 36. Iss. 9. P. 1059–1072. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00081-x](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00081-x).
7. Sahoo P., Patra K., Singh V.K., Gupta M.K., Song Qinghua, Mia M., et al. Influences of TiAlN coating and limiting angles of flutes on prediction of cutting forces and dynamic stability in micro milling of die steel (P-20) // *Journal of Materials Processing Technology*. 2020. Vol. 278. P. 116500. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116500>.
8. Arrazola P.J., Özel T., Umbrello D., Davies M., Jawahir I.S. Recent advances in modelling of metal machining processes // *CIRP Annals*. 2013. Vol. 62. Iss. 2. P. 695–718. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.006>.
9. Ozlu E., Molinari A., Budak E. Two-zone analytical contact model applied to orthogonal cutting // *Machining Science and Technology: An International Journal*. 2010. Vol. 14. Iss. 3. P. 323–343. <https://doi.org/10.1080/10910344.2010.512794>.
10. Sonawane H.A., Joshi S.S. Analytical modeling of chip geometry and cutting forces in helical ball end milling of superalloy Inconel 718 // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2010. Vol. 3. Iss. 3. P. 204–217. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.11.003>.
11. Wang S., Zhang T., Deng W., Sun Z., Sandy T. Analytical modeling and prediction of cutting forces in orthogonal turning: a review // *The international journal of advanced manufacturing technology*. 2022. Vol. 119. P. 1407–1434. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08114-y>.
12. Бобров В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов. М.: Машгиз, 1962. 152 с.
13. Li H.Z., Zhang W.B., Li X.P. Modelling of cutting forces in helical end milling using a predictive machining theory // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2001. Vol. 43. Iss. 8. P. 1711–1730. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00020-0).
14. Moufki A., Dudzinski D., Coz G. Le. An analytical thermomechanical modelling of peripheral milling process using a predictive machining theory // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 223. P. 93–100. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.223.93>.
15. Fontaine M., Devillez A., Moufki A., Dudzinski D. Predictive force model for ball-end milling and experimental validation

- with a wavelike form machining test // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006. Vol. 46. Iss. 3-4. P. 367–380. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.011>.
16. Fu Zhongtao, Yang Wenyu, Wang Xuelin, Leopold J. Analytical modelling of milling forces for helical end milling based on a predictive machining theory // *Procedia CIRP*. 2015. Vol. 31. P. 258–263. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.013>.
17. Atkins A.G. Modelling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanation for some longstanding problems // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2003. Vol. 45. Iss. 2. P. 373–396. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(03\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(03)00040-7).
18. Dargnat F., Darnis Ph., Cahuc O. On the adaptability of cutting model to drilling // 12th CIRP conference on modelling of machining operations. 2009. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/296705241_On_the_adaptability_of_cutting_model_to_drilling (дата обращения: 11.06.2023).
19. Оленин Л.Д. К анализу механики резания упрочняемого материала. Стружкообразование // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2008. № 1. С. 183–190.
20. Оленин Л.Д., Сторчак М.Г., Леквешвили М.А. К разработке аналитической модели косоугольного резания // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2014. Т. 8. № 1-2. С. 123–128. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67804>.
21. Merchant M.E. Mechanics of the metal cutting process II. Plasticity conditions in orthogonal cutting // *Journal of Applied Physics*. 1945. Vol. 16. Iss. 6. P. 318–324. <https://doi.org/10.1063/1.1707596>.
22. Оленин Л.Д. К анализу механики процесса резания. Резание инструментом с притупленной режущей кромкой // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2009. № 2. С. 143–151.
23. Tsai Chung-Liang, Liao Yunn-Shiuan. Prediction of cutting forces in ball-end milling by means of geometric analysis // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 205. Iss. 1-3. P. 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.083>.
24. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. 368 с.

References

1. Jawahir I.S., Schoop J., Kaynak Y., Balaji A.K., Ghosh R., Lu T. Progress toward modeling and optimization of sustainable machining processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020;142(11):110811. <https://doi.org/10.1115/1.4047926>.
2. Aslantas K., Ülker S., Şahan Ö., Pimenov D.Y., Giasin K. Mechanistic modeling of cutting forces in high-speed microturning of titanium alloy with consideration of nose radius. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;119:2393-2408. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08437-w>.
3. Sim Choonggun, Yang Minyang. The prediction of cutting force in ball end milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1993;33(2):267-284. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(93\)90079-a](https://doi.org/10.1016/0890-6955(93)90079-a).
4. Budak E., Altıntaş Y., Armarego E.J.A. Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1996;118(2):216-224. <https://doi.org/10.1115/1.2831014>.
5. Engin S., Altintas Y. Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part I: helical end mills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2001;41(15):2195-2212. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00045-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00045-1).
6. Lee P., Altıntaş Y. Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1996;36(9):1059-1072. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00081-x](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00081-x).
7. Sahoo P., Patra K., Singh V.K., Gupta M.K., Song Qinghua, Mia M., et al. Influences of TiAlN coating and limiting angles of flutes on prediction of cutting forces and dynamic stability in micro milling of die steel (P-20). *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;278:116500. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116500>.
8. Arrazola P.J., Özel T., Umbrello D., Davies M., Jawahir I.S. Recent advances in modelling of metal machining processes. *CIRP Annals*. 2013;62(2):695-718. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.006>.
9. Ozlu E., Molinari A., Budak E. Two-zone analytical contact model applied to orthogonal cutting. *Machining Science and Technology: An International Journal*. 2010;14(3):323-343. <https://doi.org/10.1080/10910344.2010.512794>.
10. Sonawane H.A., Joshi S.S. Analytical modeling of chip geometry and cutting forces in helical ball end milling of superalloy Inconel 718. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2010;3(3):204-217. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.11.003>.
11. Wang S., Zhang T., Deng W., Sun Z., Sandy T. Analytical modeling and prediction of cutting forces in orthogonal turning: a review. *The international journal of advanced manufacturing technology*. 2022;119:1407-1434. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08114-y>.
12. Bobrov V.F. Influence of tool major cutting edge inclination angle on metal cutting. Moscow: Mashgiz; 1956, 152 p. (In Russ.).
13. Li H.Z., Zhang W.B., Li X.P. Modelling of cutting forces in helical end milling using a predictive machining theory. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2001;43(8):1711-1730. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00020-0).
14. Moufki A., Dudzinski D., Coz G. Le. An analytical thermomechanical modelling of peripheral milling process using a predictive machining theory. *Advanced Materials Research*. 2011;223:93-100. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.223.93>.
15. Fontaine M., Devillez A., Moufki A., Dudzinski D. Predictive force model for ball-end milling and experimental validation with a wavelike form machining test. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006;46(3-4):367-380. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.011>.
16. Fu Zhongtao, Yang Wenyu, Wang Xuelin, Leopold J. Analytical modelling of milling forces for helical end milling based on a predictive machining theory. *Procedia CIRP*. 2015;31:258-263. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.013>.
17. Atkins A.G. Modelling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanation for some longstanding problems. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2003;45(2):373-396. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(03\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(03)00040-7).

18. Dargnat F., Darnis Ph., Cahuc O. On the adaptability of cutting model to drilling. In: *12th CIRP conference on modelling of machining operations*. 2009. Available from: https://www.researchgate.net/publication/296705241_On_the_adaptability_of_cutting_model_to_drilling [Accessed 11th June 2023].
19. Olenin L.D. Analysis of mechanics of the process of cutting hardened material. Chip formation. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta «MAMI» = Scientific Journal "Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2008;1:183-190. (In Russ.).
20. Olenin L.D., Storchak M.G., Lekveishvili M.A. Developing of analytical model for bevel cutting. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta «MAMI» = Scientific Journal "Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2014;8(1-2):123-128. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67804>. (In Russ.).
21. Merchant M.E. Mechanics of the metal cutting process II. Plasticity conditions in orthogonal cutting. *Journal of Applied Physics*. 1945;16(6):318-324. <https://doi.org/10.1063/1.1707596>.
22. Olenin L.D. On the analysis of cutting process mechanics. Cutting with a flattened edge tool. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta «MAMI» = Scientific Journal "Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2009;2:143-151. (In Russ.).
23. Tsai Chung-Liang, Liao Yunn-Shiuan. Prediction of cutting forces in ball-end milling by means of geometric analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;205(1-3):24-33. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.083>.
24. Zorev N.N. *Mechanical issues of the metal cutting process*. Moscow: Mashgiz; 1956, 368 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Леквешвили Мария Анатольевна,
младший научный сотрудник,
Научно-образовательный центр внедрения
лазерных технологий Владимирского государственного
университета имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых,
600014, г. Владимир, ул. Белоконской, 3Б, Россия
✉ m.shaparovskaya@mail.ru

Люхтер Александр Борисович,
к.т.н.,
директор Научно-образовательного центра
внедрения лазерных технологий,
Научно-образовательный центр внедрения
лазерных технологий Владимирского государственного
университета имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых,
600014, г. Владимир, ул. Белоконской, 3Б, Россия
3699137@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1523-0637>

Давыдов Николай Николаевич,
д.т.н., доцент,
ведущий научный сотрудник,
Научно-образовательный центр внедрения
лазерных технологий Владимирского государственного
университета имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых,
600014, г. Владимир, ул. Белоконской, 3Б, Россия
n.n.davydov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0009-0003-3392-818X>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 04.10.2023 г.;
одобрена после рецензирования 16.10.2023 г.;
принята к публикации 30.10.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maria A. Lekveishvili,
Junior Researcher,
Research and Educational Center for Laser Technology
Implementation,
Vladimir State University named after Alexander and
Nikolay Stoletovs,
3B, Belokonskaya St., Vladimir 600014, Russia
✉ m.shaparovskaya@mail.ru

Alexander B. Lyukhter,
Cand. Sci. (Eng.),
Director of the Research and Educational Center for Laser
Technology Implementation,
Vladimir State University named after Alexander and
Nikolay Stoletovs,
3B, Belokonskaya St., Vladimir 600014, Russia
3699137@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1523-0637>

Nikolay N. Davydov,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Leading Researcher of the Research and Educational
Center for Laser Technology Implementation,
Vladimir State University named after Alexander and
Nikolay Stoletovs,
3B, Belokonskaya St., Vladimir 600014, Russia
n.n.davydov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0009-0003-3392-818X>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 04.10.2023;
approved after reviewing 16.10.2023;
accepted for publication 30.10.2023.

Original article

MECHANICAL ENGINEERING



EDN: BMYSAA

DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-655-663

Particle swarm optimization support vector machine-based coal and rock cutting tool load spectrum identification method

Ruohan Liu^{1✉}, Lan Lyu², Sunbao Wang³, Zhiqiang Chai⁴^{1,3,4}Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin, China²Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract. The goal of this research is to achieve safe and efficient excavation of coal and rock tunnels with complex geological structures, and to enhance the self-sensing ability of coal and rock cutting equipment and tools. Particle swarm optimization support vector machine is used to identify the cutting state of disc cutting tools. EDEM finite element analysis software is used to analyze cutting process characteristics of the disc cutting tool when used to cut through coal and rock with different compressive strengths. Empirical mode decomposition is used to decompose the load spectrum characteristics; for this purpose, the first-order and seventh-order intrinsic mode functions containing all the feature information of the original signal of the load spectrum are selected. The sample entropy is calculated as the feature input vector. The extracted feature vector is input into the trained support vector machine model and the particle swarm optimization support vector machine model. By extracting the sample entropy of the load spectrum of the disc cutter as the feature vector, the particle swarm optimization support vector model is used to identify the cutting state of the coal and rock. The recognition accuracy of the support vector machine model before and after the improvement is compared and analyzed. The results show that compared to the unoptimized support vector machine, the support vector machine optimized by particle swarm optimization can identify the load spectrum of the coal more quickly and accurately. The recognition accuracy is 96,82%, which verifies the effectiveness of the particle swarm optimization support vector machine model in identifying the load spectrum of the coal and rock disc cutter.

Keywords: disc cutter, coal and rock, discrete element modeling, feature vector, particle swarm optimization

Acknowledgments: This work was supported by the Chinese National Natural Science Foundation (52104130 and 51974111).

For citation: Liu Ruohan, Lyu Lan, Wang Sunbao, Chai Zhiqiang. Particle swarm optimization support vector machine-based coal and rock cutting tool load spectrum identification method. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):655-663. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-655-663>. EDN: BMYSAA.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья
УДК 622

Метод распознавания диапазона нагрузок дискового резака при резке угля и горной породы на основе метода опорных векторов оптимизации роя частиц

Жохань Лю^{1✉}, Лань Люй², Суньбао Ван³, Чжицян Чай⁴^{1,3,4}Хэйлунцзянский университет науки и техники, г. Харбин, КНР²Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

Резюме. Цель – выявление решений, направленных на обеспечение безопасной и эффективной экскавации сложных геологических формаций угольных и каменных месторождений в туннелях, а также на повышение чувствительности оборудования и инструментов для резки угля и породы. Для идентификации состояния реза дискового инструмента был использован метод оптимизации роя частиц, поддерживающий метод опорных векторов. Программный продукт конечно-элементного анализа EDEM был использован для анализа характеристик дисковых резаков, применяемых для резания угольных пород с различными пределами прочности на сжатие. Спектральные характеристики нагрузки на резак были разложены на эмпирические моды, при этом были выбраны компоненты внутренних колебаний первого и седьмого порядка, содержащие всю характерную информацию из исходного сигнала спектра на-

© Liu Ruohan, Lyu Lan, Wang Sunbao, Chai Zhiqiang, 2023

грузки. Вычисленная энтропия сигнала была использована в качестве входного вектора признаков. Извлеченные векторы признаков были введены в модель опорных векторов и модель оптимизации роя частиц с поддержкой метода опорных векторов. В результате проведенных исследований на основе спектра нагрузки дискового резака была испытана модель оптимизации роя частиц с поддержкой модели опорных векторов для распознавания состояния резания и сравнивалась ее точность с неоптимизированной моделью опорных векторов. Полученные результаты указывают, что по сравнению с неоптимизированной моделью метода опорных векторов модель оптимизации роя частиц с поддержкой модели опорных векторов может быстрее и точнее идентифицировать спектр нагрузки режущего диска для резания угольной породы. Точность распознавания составляет 96,82%, что подтверждает эффективность данной модели при определении спектра нагрузок режущего диска, применяемого для работы с угольными породами.

Ключевые слова: дисковая фреза, уголь и горная порода, моделирование методом дискретных элементов, вектор признаков, оптимизация роя частиц, метод опорных векторов оптимизации роя частиц

Благодарности: Исследования выполнены при поддержке Китайского национального фонда естественных наук (52104130 и 51974111).

Для цитирования: Лю Жохань, Люй Лань, Ван Суньбао, Чай Чжицян. Метод распознавания состояния резки дискового резака на основе метода опорных векторов оптимизации роя частиц // *iPolytech Journal*. 2023. Т. 27. № 4. С. 655–663. (In Eng.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-655-663>. EDN: BMYSAА.

ВВЕДЕНИЕ

Cantilever roadheader is the main equipment in coal mines, and its working environment is complicated. The load spectrum of the working mechanism of the tool cutting coal and rock, which contains rich information, and the characteristics of the load spectrum under different working conditions can help identify the cutting state of the tool, which has certain practical significance to improve the intelligent cutting of roadheader [1, 2].

The load spectrum of coal and rock cut by disc tool is nonlinear and has certain randomness, so there are some difficulties in extract its frequency features. The variational modal decomposition (VMD) needs to determine the number of modes and their boundary effects artificially in advance when extracting the sample entropy as a feature vector, which limits its application. The wavelet transform algorithm is used to extract the features of the disc tool load spectrum with partial energy signal loss and the limitation of basis function selection, which is not suitable for its decomposition [3]. For the characteristics of the research subject, the sample entropy of intrinsic mode function (IMF) component is obtained by empirical mode decomposition (EMD), and the characteristic information of the disc tool load is extracted effectively by solving the problems of preset modal number and basis function selection [4–6]. Compared to neural networks, support vector machines (SVMs) are suitable for solving high-dimensional, small-sample, nonlinear problems and can effectively classify small-sample data, but it is particularly important to select appropriate SVM parameters, otherwise they are prone to fall into local optima and poor state recognition rates [7–9].

For this research, the disc tool load spectrum is taken as the research subject to address the above problems, EMD decomposition is used to extract the sample entropy as the feature vector, particle swarm optimization (PSO) algorithm is used to adaptively select the parameters of the support vector machine, algorithm validation is performed on the disc tool cut coal and rock load spectrum dataset that is classified and identified by support vector machine (SVM) and PSO-SVM. Its accuracy on the load spectrum recognition is explored, and the application of PSO-SVM model for coal and rock-cutting disc tool recognition based on the load spectrum is realized.

FEATURE EXTRACTION OF DISC TOOL LOAD SPECTRUM

Simulation analysis of coal and rock cut by disc tool using discrete element modeling software EDEM was conducted with the following parameters: the density of coal and rock is 1280, 2460, and 2630 kg/m³; Poisson's ratio of coal and rock is 0,28, 0,24, 0,23, and 0,31; elastic modulus of coal and rock is 2010, 3260, and 12100 MPa; normal contact stiffness of coal and rock is 1,108×10⁸, 9,744×10⁸, and 7,472×10⁷ N/m³; and tangential contact stiffness of coal and rock is 8,514×10⁷, 1,068×10⁹, and 8,545×10⁸ N/m³; the density of disc tool is 17850 kg/m³; Poisson's ratio of disc tool is 0,31. According to the discrete element method theory, the coal and rock is regarded as composed of discrete particles [10, 11]. In the discrete element software EDEM, the coal and rock particle model is established as a spherical particle with a diameter of 4 mm and a contact radius of 4.6 mm. The wedge angle of the disc tool is 55°, and the simulation model of the disc tool cutting coal and rock is shown in Fig. 1.

The stress cloud of the disc tool is shown in Fig. 2 for the situation when the simulated disc tool is used to cut the broken coal and rock. The derived

load data can be obtained under three cutting states, and the data is then input into Matlab to obtain the corresponding load spectrum.

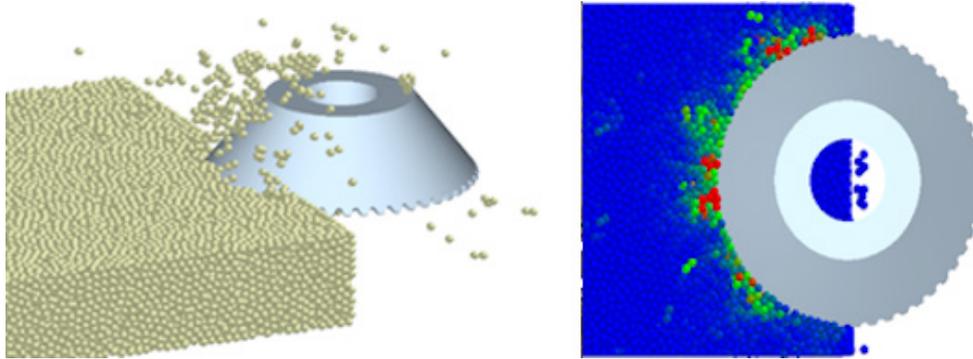


Fig. 1. Discrete element modeling of disc cutting tools for crushing coal and rock
Рис. 1. Конечнo-элементное моделирование дисковых резцов для дробления угля и горной породы методом дискретных элементов

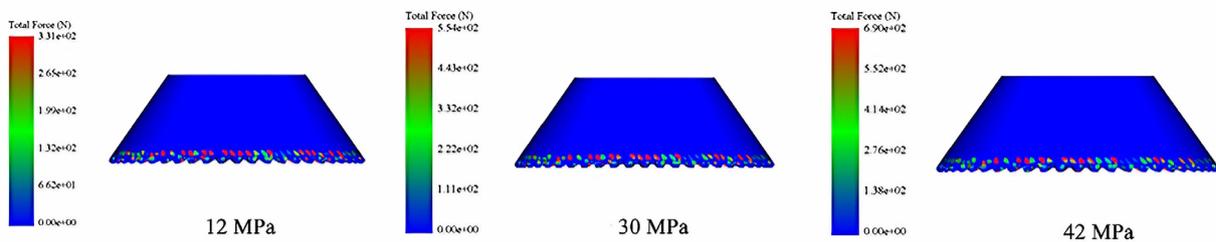


Fig. 2. Simulation stress cloud map of disc cutting tools
Рис. 2. Карта облака напряжений при моделировании дисковых резцов

In EDEM, 30 samples were collected for each class of states, and divided into training and test sets with a ratio of 7:3. The disc tool starts to enter at the coordinate zero point, and

more than 1500 valid data samples are collected for each state, and the three truncated coal and rock state load spectra are shown in Fig. 3.

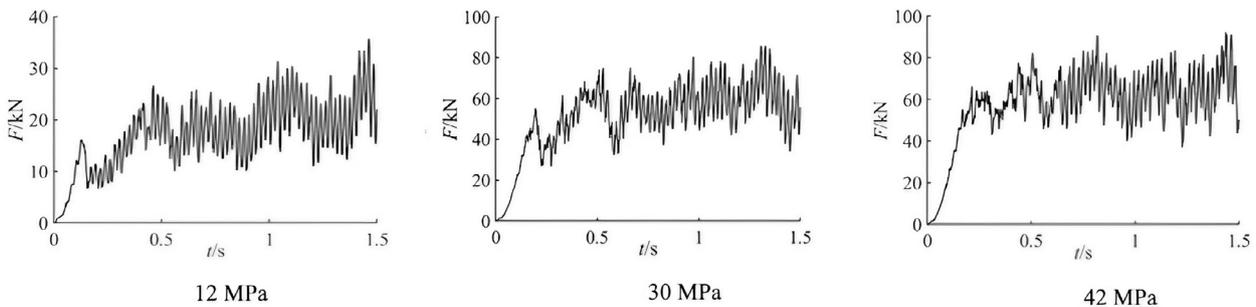


Fig. 3. Three load state curves
Рис. 3. Три кривые нагрузки различных состояний

PSO-SVM STATE IDENTIFICATION MODEL, SUPPORT VECTOR MACHINE PRINCIPLE

Support vector machine (SVM) has improved the generalization ability in finding the process that minimizes the overall structured risk, so that good regression ability can still be maintained in small samples of the truncated load spectrum. The disc tool truncated coal and rock load spectrum has nonlinearity, and there exist sample sets $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n), \dots, x_n \in R^p, y_n \in R,$

$(n = 1, 2, \dots, i),$ and the basic idea is to use the nonlinear mapping $\phi(x)$ to map into the high-dimensional space and perform linear regression to obtain the function as follows:

$$f(x) = \omega\phi(x) + b, \tag{1}$$

where ω is the regression function weight vector; b is the bias with non-unique dimension.

After removing the idiosyncratic points in the

nonlinear case, the remaining part is linearly inseparable, implying that this point is less than 1. The relaxation variable ξ_i is introduced to construct the optimal hyperplane with the constraint:

$$\omega\phi(x) + b \geq 1 - \xi_i \quad (2)$$

The optimization function is expressed as follows:

$$\min_{\omega, b, \xi} \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^N \xi_i, \quad (3)$$

where C is a constant that constrains the degree of penalty:

$$\text{s.t } y_i (\omega\phi(x) + b) \geq 1 - \xi_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$\xi_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N..$$

Using Lagrange multipliers, the Lagrange function is established, while the kernel function $k(x_i, x_j)$ is introduced, and the SVM regression function expression is obtained as:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N (a_i - a_i^*) K(x_i, x_j) + b, \quad (5)$$

where a_i, a_i^* is Lagrange multipliers, $a_i \geq 0, a_i^* \geq 0, a_i \times a_i^* = 0$.

The artificially selected parameters of the kernel function g , and the constant C , which constrains the degree of penalty, have poor generalization ability. Thus, it is necessary to optimize the penalty coefficient C in the SVM model and the parameters of the selected kernel function when using SVM for load spectrum classification, and to optimize the hyperparameters of the SVM using the PSO algorithm to improve the accuracy of the SVM in recognizing the load spectrum.

PSO ALGORITHM

PSO is initialized as a population of random particles (random solutions), and the optimal solution is found by iteration. In each iteration [12–14], the particle updates itself by tracking two "extremes" ($pbest, gbest$). $pbest$ and $gbest$ are the individual and population optimums, respectively, and after finding these two optimums, the particle updates its velocity and position as:

$$\begin{aligned} v_i &= \omega v_i + c_1 r_1 (pbest_i - x_i) + c_2 r_2 (gbest - x_i) \\ x_i &= x_i + v_i, \end{aligned} \quad (6)$$

where $i = 1, 2, \dots, N$; N is the total number of particles in this cluster; v_i is this cluster; v_i is the velocity of the particles; r_1 and r_2 are random

number between 0 and 1; x_i is the current position of the particle; c_1 and c_2 are the learning factors (usually $c_1 = c_2 = 2$); ω is the inertia factor; and the two listed equations are the standard forms of PSO.

The larger the value of the inertia factor, the stronger the global search ability and the weaker the local search ability; the smaller the value, the weaker the global search ability and the stronger the local search ability. In order to get a better inertia factor, a linear decreasing weight (LDW) strategy is used, as shown in the following equation, which will become smaller and smaller as the number of iterations increases:

$$\omega' = (\omega_i - \omega_e)(G_k - g) / G_k + \omega_e, \quad (7)$$

where ω_i is the initial inertia factor, ω_e is the inertia factor at the maximum number of iterations, G_k is the number of iterations, g is the global optimum.

For different search problems, the global and local search capabilities can be adjusted so that the PSO algorithm can optimize the parameters of the SVM.

IMPROVED PSO-SVM ALGORITHM

In this paper, the particle swarm algorithm is used to optimize the SVM by determining the number of populations and the maximum number of iterations [15–17], and adjusting its speed and position according to the current individual extremum it finds and the current global optimal solution shared by the whole particle swarm [18–20]. The principle of the disc tool cutting state recognition model of the roadheader mentioned in the paper is to perform EMD decomposition on the collected disc tool load spectra, extract the sample entropy of each IMF component as a feature vector, divide it into training set and test set, input to the state recognition model of particle swarm algorithm optimized SVM, and obtain the recognition results.

IDENTIFICATION OF TRUNCATED STATE LOAD SPECTRUM, EMD DECOMPOSITION

The EMD decomposition is calculated as follows.

According to the signal $x(t)$, the local maxima and local minima are connected by three spline curves, so that the whole signal sequence is between the upper and lower envelopes, Find the mean value of the two $m_1(t)$, to obtain $h_1(t)$ as follows:

$$x(t) - m_1(t) = h_1(t), \quad (8)$$

If $h_1(t)$ does not satisfy the precondition, consider $h_1(t)$ as a new signal sequence and apply the previous equation to find one that satisfies the condition, denoted as $c_1(t)$. $c_1(t)$ represents the EMD decomposition of the obtained signal sequence.

Separate the signal sequences and obtain a new signal sequence as follows:

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t). \quad (9)$$

Consider $r_1(t)$ as a new signal sequence $x(t)$, process it according to step 1 and step 2, and record the remaining signal sequence as i , where i is taken as 1, 2, ... m and repeat equation in step 1 m times, and stop when the termination condition is satisfied, resulting in the following:

$$\begin{cases} r_1(t) - c_2(t) = r_2(t) \\ r_2(t) - c_3(t) = r_3(t) \\ \vdots \\ r_{m-1}(t) - c_m(t) = r_m(t) \end{cases} \quad (10)$$

The signal sequence is decomposed from equations from steps 1 and 2 as follows:

$$s(t) = \sum_{i=1}^m c_i(t) + r_m(t), \quad (11)$$

where $r_m(t)$ is the residual term.

To ensure that the IMF component is meaningful, the standard deviation is used to determine when the «sieving» is over.

$$Z = \sum_{t=0}^T \frac{|h_{i-1}(t) - h_i(t)|^2}{h_{i-1}^2(t)}, \quad (12)$$

where T is the total time of the discrete signal sequence.

To ensure the stability and linearity of the IMF component and to ensure that the eigenmodal function has the corresponding physical significance, Z is taken as 0,2.

SAMPLE ENTROPY

The sample entropy (SE) is a measure of the complexity of the time series and is calculated as follows.

1. For the time series $\{x(i) = x(1), x(2), \dots, x(N)\}$, the reconstructed time series is obtained as follows:

$$\{x(i)\} = \{x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)\} \frac{n!}{r!(n-r)!}, \quad (13)$$

where m is the embedding dimension and N represents the time duration.

2. Calculate the distance in the new time series with the formula

$$d_{ij} = d[x(i), x(j)] = \max[|x(i+k) - x(j+k)|], \quad (14)$$

where d_{ij} is the one with the largest difference of the corresponding element.

3. Calculate the amount of distance d_{ij} less than the similarity tolerance r to obtain $B_i^m(r)$, which is given by the following formula:

$$B_i^m(r) = \frac{d_{ij} < r}{N - m}, \quad i \in [1, N - m] \quad (15)$$

4. Find the mean of $B_i^m(r)$ using the formula:

$$B^m(r) = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{i=1}^{N-m+1} B_i^m(r). \quad (16)$$

5. For the $m+1$ -dimension, repeat steps 1 to 5 to obtain $B^{m+1}(r)$.

The SE definition formula for the original sequence is expressed as follows:

$$SampEn(m, r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[-\ln \frac{B^{m+1}(r)}{B^m(r)} \right]. \quad (17)$$

When it is a finite number, its formula is expressed as follows:

$$SampEn(m, r, N) = \ln B^m(r) - B^{m+1}(r). \quad (18)$$

FEATURE EXTRACTION AND RESULT ANALYSIS

The results of using the EMD algorithm to adaptively decompose the load spectrum are shown in Fig. 4.

Because of the different number of IMF components obtained from EMD decomposition of different types of load spectra, in order to maintain the same length of feature vectors in different states and include all information of the original load spectrum, the first 7 IMF components are selected to represent the original load spectrum. The extracted sample entropy values are calculated. 21 sets of data from each cutting state load spectrum were selected as the training set, and the remaining 9 sets of data as the test set. To verify the advantages of the PSO-SVM model proposed in the article, it was compared with the unoptimized SVM model with an initial population of 1000 and a maximum number of iterations of 300. The experimental results are

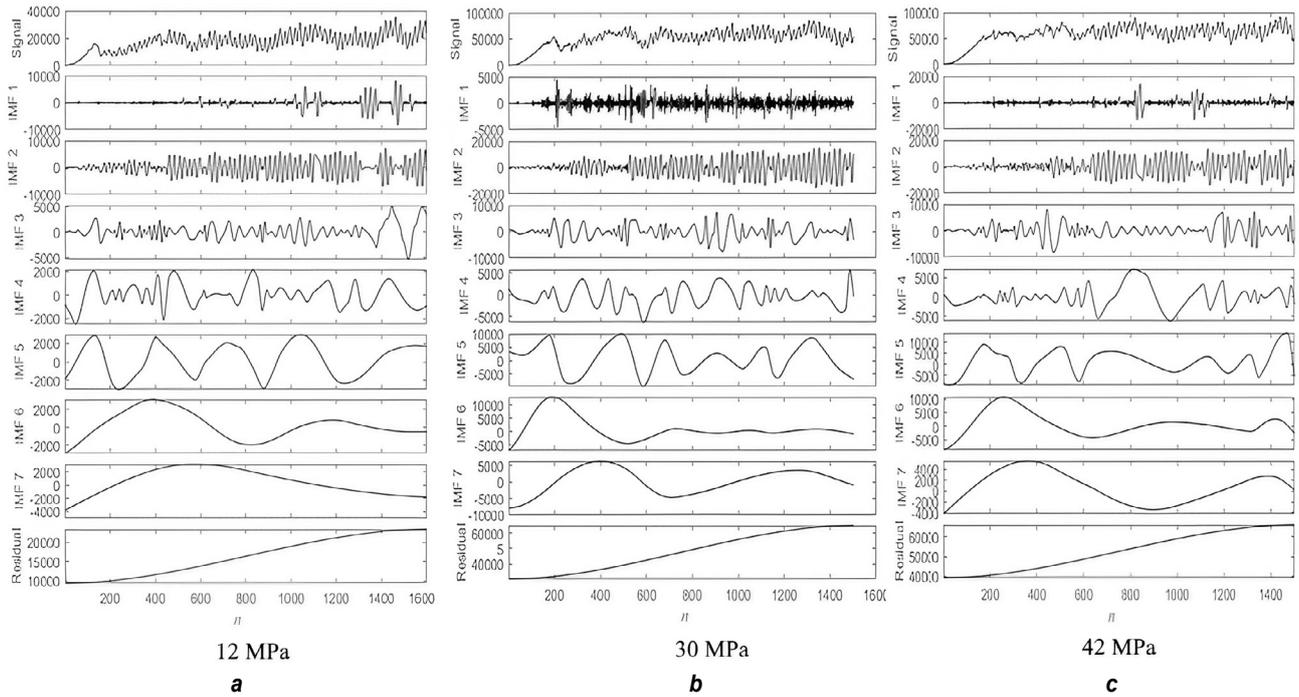


Fig. 4. EMD decomposition of different cutting load spectra (a, b, c)

Рис. 4. Эмпирическая модальная декомпозиция различных спектров нагрузки при резке (a, b, c)

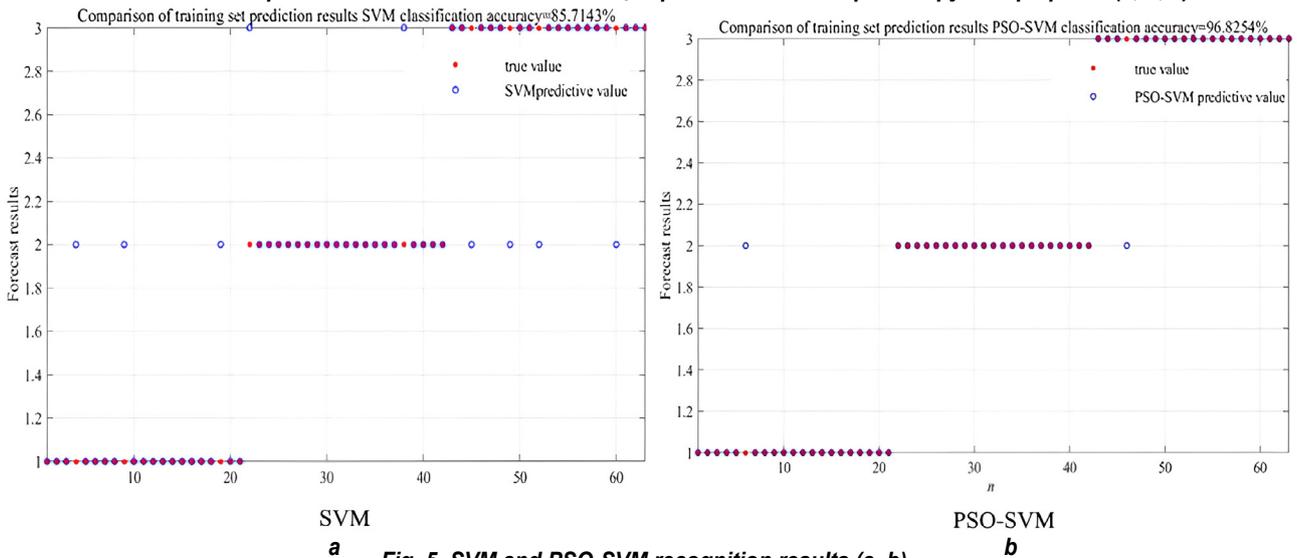


Fig. 5. SVM and PSO-SVM recognition results (a, b)

Рис. 5. Результаты распознавания метода опорных векторов и модели оптимизации роя частиц с поддержкой метода опорных векторов (a, b)

shown in Fig. 5.

The classification accuracy of SVM is 85,71%, and the recognition accuracy of PSO-SVM is 96,82%. Compared with unoptimized, particle swarm optimization algorithm has shorter optimization time and higher optimization accuracy.

CONCLUSION

The recognition algorithm of disc cutting tool load spectrum based on PSO-SVM utilizes PSO adaptive optimization of SVM parameters. The disc cutting tool cutting coal and rock load

spectrum is selected as the test set, and the accuracy of support vector machine model recognition before and after improvement is compared and analyzed. The results show that by extracting the sample entropy of the cutting state load spectrum of the disc cutter as the feature vector and using the PSO-SVM model to identify the cutting state of coal and rock, the time and accuracy of the tool cutting are better than those of the unoptimized SVM, with less time consumption and a recognition accuracy of 96,82%. Based on the PSO-SVM model, an analysis was conducted on the dataset of coal and

rock load spectra for disc cutting tools, verifying the effectiveness of the PSO-SVM model in identifying coal and rock load spectra for disc cutting tools.

References

1. Wang Hong. The 40 years developmental review of the fully mechanized mine roadway heading technology in China. *Journal of China Coal Society*. 2010;35(11):1815-1820.
2. Liu Chunsheng, Li Degen, Yuan Hao. Theoretical mechanics model and load characteristics of coal and rock vibration cutting with disc cutter. *Journal of China Coal Society*. 2020;45(8):3015-3023.
3. Zhao Yan, Dang Kangjia, Sun Jiangshan. Fault diagnosis method of high-voltage circuit breaker based on SVM optimized firefly algorithm. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*. 2023;33(1):123-128.
4. Sun Jingyun, Zhao Panpan, Ding Yi. RMB Exchange Rate Prediction Based on Sample Entropy Reconstruction and PSO Optimization Algorithm. *Mathematics in Practice and Theory*. 2021;51(19):70-83.
5. Liu Chunsheng, Liu Yanting, Li Degen, Liu Ruohan, Ren Chungping, Yuan Hao. The mechanism and load model of the interaction between the disc blade and coal and rock under axial vibration cutting. *Journal of China Coal Society*. 2023;48(1):484-496.
6. Saini M., Sinwar D., Swarith A.M., Kumar A. Reliability and maintainability optimization of load haul dump machines using genetic algorithm and particle swarm optimization. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2023;29(2):234-240. <https://doi.org/10.1108/JQME-11-2021-0088>.
7. Meng Fannian, Du Wenliao, Gong Xiaoyun, Li Hao, Xie Guizhong. Fault Recognition of Rolling Bearings Based on LSSVM Optimized by Particle Swarm Optimization. *Bearing*. 2020;12(493):43-50.
8. Jin Dalong, Yuan Dajun, Li Xinggao, Su Weilin. Probabilistic analysis of the disc cutter failure during TBM tunneling in hard rock. *Tunneling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*. 2021;109:103744. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103744>.
9. Moodi M., Ghazvini M., Moodi H. A hybrid intelligent approach to detect android botnet using smart self-adaptive learning-based PSO-SVM. *Knowledge-based Systems*. 2021;222:106988. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.106988>.
10. Kochetkova A.S. Handling equipment in the mining industry: analysis and comparison. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the Tula State University. Series: Technical Sciences*. 2021;6:218-221. (In Russ.). <https://orcid.org/10.24412/2071-6168-2021-6-218-221>.
11. Naeimipour A., Rostami J., Buyuksagis I.S., Frough O. Estimation of rock strength using scratch test by a miniature disc cutter on rock cores or inside boreholes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018;107:9-18. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.03.020>.
12. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Tiloev K.Z. Cone rolling to crawler excavator. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie = Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering Industry*. 2018;18(1):34-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/engin180104>.
13. Flora M., Jäger M., Teuscher P. Selection and specification of a tunnel boring machine as the leading factor for the achievement of project goals. *Geomechanics and Tunneling*. 2018;11(5):450-455. <https://doi.org/10.1002/geot.201800044>.
14. Stopka G. Modelling of rock cutting with asymmetrical disc tool using discrete-element method (DEM). *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021;54:6265-6279. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02611-y>.
15. Bulut B., Gunduz O., Baydogan M., Kayali E.S. Determination of matrix composition for diamond cutting tools according to the hardness and abrasivity properties of rocks to be cut. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2021;95:105466. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105466>.
16. Johansson D., Hrechuk A., Bushkya V., Mårtensson M., Can A., Ståhl J.-E. Small scale testing of PCD and WC-Co tooling in rock cutting using longitudinal turning. *Wear*. 2019;426-427(B):1515-1522. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.036>.
17. Alehossein H., Li Xingsheng, Boland J. Towards improving rock cutting tools using thermally stable diamond composites. *Advanced Materials Research*. 2009;76-78:585-590. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204848>.
18. Zhou Xiao-Ping, Zhai Shu-Fang, Bi Jing. Two-dimensional numerical simulation of rock fragmentation by TBM cutting tools in mixed-face ground. *International Journal of Geomechanics*. 2018;18(3):06018004. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001081](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001081).
19. Sarwary E., Hagap C.P. The effect of changes in tool tip angle on the cutting performance of a pointed pick. *Mining Technology*. 2016;125(3):184-190. <https://doi.org/10.1080/14749009.2016.1159056>.
20. Rostamsowlat I., Richard T., Evans B. Experimental investigation on the effect of wear flat inclination on the cutting response of a blunt tool in rock cutting. *Acta Geotechnica*. 2019;14(2):519-534. <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0674-1>.

Список источников

1. Wang Hong. The 40 years developmental review of the fully mechanized mine roadway heading technology in China // *Journal of China Coal Society*. 2010. Vol. 35. Iss. 11. P. 1815–1820.
2. Liu Chunsheng, Li Degen, Yuan Hao. Theoretical mechanics model and load characteristics of coal and rock vibration

- cutting with disc cutter // *Journal of China Coal Society*. 2020. Vol. 45. Iss. 8. P. 3015–3023.
3. Zhao Yan, Dang Kangjia, Sun Jiangshan. Fault diagnosis method of high-voltage circuit breaker based on SVM optimized firefly algorithm // *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*. 2023. Vol. 33. Iss. 1. P. 123–128.
4. Sun Jingyun, Zhao Panpan, Ding Yi. RMB Exchange Rate Prediction Based on Sample Entropy Reconstruction and PSO Optimization Algorithm // *Mathematics in Practice and Theory*. 2021. Vol. 51. Iss. 19. P. 70–83.
5. Liu Chunsheng, Liu Yanting, Li Degen, Liu Ruohan, Ren Chunping, Yuan Hao. The mechanism and load model of the interaction between the disc blade and coal and rock under axial vibration cutting // *Journal of China Coal Society*. 2023. Vol. 48. Iss. 1. P. 484–496.
6. Saini M., Sinwar D., Swarith A.M., Kumar A. Reliability and maintainability optimization of load haul dump machines using genetic algorithm and particle swarm optimization // *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2023. Vol. 29. Iss. 2. P. 234–240. <https://doi.org/10.1108/JQME-11-2021-0088>.
7. Meng Fannian, Du Wenliao, Gong Xiaoyun, Li Hao, Xie Guizhong. Fault Recognition of Rolling Bearings Based on LSSVM Optimized by Particle Swarm Optimization // *Bearing*. 2020. Vol. 12. Iss. 493. P. 43–50.
8. Jin Dalong, Yuan Dajun, Li Xinggao, Su Weilin. Probabilistic analysis of the disc cutter failure during TBM tunneling in hard rock // *Tunneling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*. 2021. Vol. 109. P. 103744. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103744>.
9. Moodi M., Ghazvini M., Moodi H. A hybrid intelligent approach to detect android botnet using smart self-adaptive learning-based PSO-SVM // *Knowledge-based Systems*. 2021. Vol. 222. P. 106988. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.106988>.
10. Кочеткова А.С. Подъемно-транспортное оборудование в горной промышленности: анализ и сравнение // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2021. № 6. С. 218–221. <https://orcid.org/10.24412/2071-6168-2021-6-218-221>.
11. Naeimipour A., Rostami J., Buyuksagis I.S., Frough O. Estimation of rock strength using scratch test by a miniature disc cutter on rock cores or inside boreholes // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 107. P. 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2018.03.020>.
12. Кромский Е.И., Кондаков С.В., Тиллоев К.З. Конусный раскатчик к гусеничному экскаватору // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. 2018. Т. 18. № 1. С. 34–39. <https://doi.org/10.14529/engin180104>.
13. Flora M., Jäger M., Teuscher P. Selection and specification of a tunnel boring machine as the leading factor for the achievement of project goals // *Geomechanics and Tunneling*. 2018. Vol. 11. Iss. 5. P. 450–455. <https://doi.org/10.1002/geot.201800044>.
14. Stopka G. Modelling of rock cutting with asymmetrical disc tool using discrete-element method (DEM) // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021. Vol. 54. P. 6265–6279. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02611-y>.
15. Bulut B., Gunduz O., Baydogan M., Kayali E.S. Determination of matrix composition for diamond cutting tools according to the hardness and abrasivity properties of rocks to be cut // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2021. Vol. 95. P. 105466. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105466>.
16. Johansson D., Hrechuk A., Bushkya V., Mårtensson M., Can A., Ståhl J.-E. Small scale testing of PCD and WC-Co tooling in rock cutting using longitudinal turning // *Wear*. 2019. Vol. 426-427. Iss. B. P. 1515–1522. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.036>.
17. Alehossein H., Li Xingsheng, Boland J. Towards improving rock cutting tools using thermally stable diamond composites // *Advanced Materials Research*. 2009. Vol. 76-78. P. 585–590. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204848>.
18. Zhou Xiao-Ping, Zhai Shu-Fang, Bi Jing. Two-dimensional numerical simulation of rock fragmentation by TBM cutting tools in mixed-face ground // *International Journal of Geomechanics*. 2018. Vol. 18. Iss. 3. P. 06018004. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001081](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001081).
19. Sarwary E., Hagap C.P. The effect of changes in tool tip angle on the cutting performance of a pointed pick // *Mining Technology*. 2016. Vol. 125. Iss. 3. P. 184–190. <https://doi.org/10.1080/14749009.2016.1159056>.
20. Rostamsowlat I., Richard T., Evans B. Experimental investigation on the effect of wear flat inclination on the cutting response of a blunt tool in rock cutting // *Acta Geotechnica*. 2019. Vol. 14. Iss. 2. P. 519–534. <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0674-1>.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ruohan Liu,

Postgraduate Student, Lecturer,
Heilongjiang University of Science and Technology,
2468, PuYuan Road, SongBei District,
Harbin 150022, China
✉ wzdzq_2011@126.com
<https://orcid.org/0009-0005-2875-5821>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лю Жохань,

аспирант, преподаватель,
Хэйлунцзянский университет науки и технологии,
г. Харбин,
150022, дорога Пуюань, район Сонгбэй,
г. Харбин, 2468, Хэйлунцзян, Китай
✉ wzdzq_2011@126.com
<https://orcid.org/0009-0005-2875-5821>

Lan Lyu,

Postgraduate Student,
Komsomolsk-on-Amur State University,
27, Lenin Prospect, Komsomolsk-on-Amur
681013, Russia
Deputy director for international affairs,
Heilongjiang University of Science and Technology,
2468, PuYuan Road, SongBei District,
Harbin 150022, China
lvlan@1980@163.com
<https://orcid.org/0009-0003-0874-3810>

Sunbao Wang,

Master's Degree Student,
Heilongjiang University of Science and Technology,
2468, PuYuan Road, SongBei District,
Harbin 150022, China
1534452919@qq.com
<https://orcid.org/0009-0004-3227-6746>

Zhiqiang Chai,

Master's Degree Student,
Heilongjiang University of Science and Technology,
2468, PuYuan Road, SongBei District,
Harbin 150022, China
903723737@qq.com
<https://orcid.org/0009-0000-2868-5222>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 01.09.2023;
approved after reviewing 13.11.2023;
accepted for publication 20.11.2023 .

Люй Лань,

аспирант,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия
заместитель начальника международного отдела,
Хэйлунцзянский научно-технический университет,
г. Харбин,
150022, дорога Пуюань, район Сонгбэй,
г. Харбин, 2468, Хэйлунцзян, Китай
lvlan@1980@163.com
<https://orcid.org/0009-0003-0874-3810>

Ван Суньбао,

магистрант,
Хэйлунцзянский университет науки и технологии,
г. Харбин,
150022, дорога Пуюань, район Сонгбэй,
г. Харбин, 2468, Хэйлунцзян, Китай
1534452919@qq.com
<https://orcid.org/0009-0004-3227-6746>

Чай Чжицян,

магистрант,
Хэйлунцзянский университет науки и технологии,
г. Харбин,
150022, дорога Пуюань, район Сонгбэй,
г. Харбин, 2468, Хэйлунцзян, Китай
903723737@qq.com
<https://orcid.org/0009-0000-2868-5222>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.09.2023 г.;
одобрена после рецензирования 13.11.2023 г.;
принята к публикации 20.11.2023 г.



Научная статья
УДК 681.521
EDN: MBBRWI
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-664-681

Автоматизированная сборка изделий роботом-манипулятором с динамометрическим контролем процесса затягивания винтовых соединений

Я.Ю. Пикалов^{1✉}, Н.В. Штабель², М.В. Брунгардт³, С.Б. Ткачёв⁴

¹⁻⁴Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва,
г. Красноярск, Россия

Резюме. Цель – разработать концепцию робототехнического комплекса, выполняющего установку деталей и их закрепление с использованием резьбовых соединений роботом-манипулятором. Экспериментальный стенд был реализован на базе промышленного робота-манипулятора KUKA KR6 R900. Управляющая программа для робота выполнена на языке Kuka Robot Language, предлагаемые исполнительные механизмы являются авторской разработкой. Предложены два варианта исполнительного устройства с контролем затяжки винтов. Первое устройство использует вращательное движение фланца кисти робота-манипулятора для затягивания винтов. Второе с одной стороны имеет захват для установки деталей на изделия, с другой стороны – приводной инструмент с заданным предельным моментом затяжки. Показано, что оба исполнительных устройства обеспечивают выполнение полного цикла завинчивания крепежного элемента в деталь от наживления до затяжки с требуемым усилием. В первом устройстве для контроля усилия затяжки используется тензобалка, сигнал с которой обрабатывается микроконтроллером Arduino Mini, расположенным во вращающемся устройстве. Сигнал отправляется по беспроводному интерфейсу на стационарный контроллер, посылающий стоп-сигнал на робота. Экспериментальным путем установлено, что из-за наличия беспроводного интерфейса при передаче сигнала наблюдается некоторая задержка между достижением предельного значения момента и остановкой вращения робота, в результате чего значение фактически достигаемого момента может превышать установленное на 60%. Во втором приспособлении, где ограничение крутящего момента происходит по току в двигателе привода, выявлено, что абсолютная погрешность установки момента затяжки не превышает 0,8 Н·м в диапазоне от 0 до 25 Н·м или 3,03% (погрешность стандартных динамометрических ключей составляет около 4%). С целью более полного соответствия современным киберфизическим производственным системам планируется интеграция в данный комплекс интеллектуальных функций контроля процесса затяжки винтовых соединений на основе методов машинного обучения.

Ключевые слова: робототехника, роботизированная сборка, захват, тензометрический контроль момента, беспроводная передача данных, силомоментный датчик

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственный контракт No. FEFE-2020-0017).

Для цитирования: Пикалов Я.Ю., Штабель Н.В., Брунгардт М.В., Ткачёв С.Б. Автоматизированная сборка изделий роботом-манипулятором с динамометрическим контролем процесса затягивания винтовых соединений // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 664–681. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-664-681>. EDN: MBBRWI.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Automated assembly of products by a robot-manipulator with dynamometric control of screw joint tightening

Yakov Yu. Pikalov^{1✉}, Nikolay V. Shtabel², Maxim V. Brungardt³, Stepan B. Tkachev⁴

¹⁻⁴Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. In this work, we develop a conceptual scheme for a robotic complex to perform the installation of parts and their fastening using threaded joints by a robot manipulator. A test bench was created on the basis of a KUKA KR6 R900 industrial robot-manipulator. The robot control software was implemented using the KUKA Robot Language. The proposed actuators are the authors' original development. Two variants of the actuator with screw tightening control are proposed. The

© Пикалов Я.Ю., Штабель Н.В., Брунгардт М.В., Ткачёв С.Б., 2023

first actuating device uses the rotational motion of the robot hand flange to tighten the screws. The second actuating device is equipped, on one side, with a gripper for mounting parts on the product and, on the other side, with a drive tool with a predetermined tightening torque limit. It is shown that both actuating devices ensure a complete cycle of screwing a fastener into a workpiece, from engaging to tightening with the required torque. In the first device, the tightening force is controlled with a strain gauge, the signal from which is processed by an Arduino Mini microcontroller located in a rotating device. The signal is forwarded wirelessly to a stationary controller that sends a stop signal to the robot. It was experimentally established that, due to the presence of the wireless interface, some delay is observed between reaching the torque limit value and stopping the robot rotation during signal transmission. As a result, the value of the actually reached torque may exceed the set value by 60%. In the second device, where torque limitation is based on the current in the drive motor, the absolute error of the torque setting does not exceed 0.8 N·m in the range from 0 to 25 N·m or 3.03% (the error of standard torque wrenches is about 4%). In order to meet the requirements of state-of-the-art cyber-physical production systems, the proposed complex should be complemented with intelligent functions of controlling the process of tightening screw joints on the basis of machine learning methods.

Keywords: robotics, robotic assembly, grasp, strain gauge torque control, wireless data transmission, force-torque sensor

Funding: The work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Contract No. FEFE-2020-0017).

For citation: Pikalov Ya.Yu., Shtabel N.V., Brungardt M.V., Tkachev S.B. Automated assembly of products by a robot-manipulator with dynamometric control of screw joint tightening. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):664-681. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-664-681>. EDN: MBBRWI.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование технологических процессов сборки и отдельных ее операций является актуальным направлением исследования на пути к повышению эффективности производства изделий. Среди ряда различных сборочных операций наибольшее распространение получили резьбовые соединения. Резьбовые соединения в конструкциях разной техники и приборов составляют 15–25% от общего количества соединений. Использование такого вида соединений обусловлено его простотой, надежностью, а также возможностью разборки и повторной сборки без замены сборочных единиц⁵. При всех достоинствах резьбовых соединений трудоемкость операций по их сборке в различных отраслях производства может достигать 70% от общего объема сборочных операций⁶.

Одним из способов снижения трудозатрат на выполнение сборочных операций является применение специализированных робототехнических комплексов, позволяющих автоматизировать и ускорить процесс сборки изделия [1–5]. Однако многие принципиальные вопросы и инженерные проблемы по-прежнему препятствуют обеспечению высокой надежности при использовании средств автоматизации и роботизации для этих целей.

Использование робототехнических ком-

плексов для сборки резьбовых соединений может быть реализовано исключительно путем применения специальных исполнительных устройств, имеющих средства обратной связи для контроля технологических параметров. Именно средства обратной связи могут позволить выполнять операции сборки резьбовых соединений с заданной надежностью, определяемой качеством обеспечения заданных технологических параметров, среди которых требуется требуемое усилие затяжки.

В целях автоматизации сборочных операций наиболее часто применяют гибкие производственные системы. В общем случае гибкие производственные системы основаны на базе адаптивного робототехнического комплекса, включающего в себя робот-манипулятор, исполнительное устройство, датчики и различные периферийные устройства. Типовая структура робототехнического комплекса для сборки простых изделий раскрыта в статье [6, с. 74]. Описание истории автоматизации процесса сборки резьбовых соединений отражено в специализированном источнике [7, с. 10–11], авторами данной статьи изучены текущие наработки и выявлены проблемы, которые необходимо решить для полной автоматизации операций сборки резьбовых соединений

Цель исследования – автоматизация процессов узловой сборки изделий с использованием винтовых соединений.

⁵Рогов В.А. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2023. 351 с.

⁶Новиков М.П. Основы технологии сборки машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1980. 592 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Существующие робототехнические комплексы для сборки резьбовых соединений решают следующие основные задачи:

1. Перемещение робота-манипулятора по 6 степеням свободы для осуществления сборки изделий различной пространственной конфигурации. Одно из решений задачи выполнено методом (уравнением) прямой кинематики для робота-манипулятора Nachi в статье [1, с. 75–76].

2. Захват крепежного изделия исполнительным устройством из ложеента или подающего устройства. Для решения данной задачи применяются исполнительные устройства, оснащенные вакуумным адаптером и захватом^{7,8} [8–10].

3. Совмещение осей крепежного изделия и резьбового отверстия в детали путем коррекции позиционирования с использованием средств технического зрения [11]. Одно из решений задачи применительно к 4-осевому роботу отражено в статье [12].

4. Наживление крепежного изделия в резьбовое отверстие при помощи средств активной или пассивной адаптации движения, а также их комбинации [9].

5. Контроль требуемого усилия затяжки для различных крепежных изделий в деталь.

6. Обнаружение и предотвращение аварийных ситуаций, возникающих в процессе сборки, вызванных заклиниванием резьбы из-за ошибочного позиционирования крепежного изделия, а также дефектов резьб ответных частей. Решение данной задачи подробно описано в работе [7].

7. Повышение точности сборки и минимизация аварийных ситуаций на основе импедансной модели среды и динамической модели коллаборативного робота [13].

При рассмотрении различных роботизированных комплексов было выявлено, что все системы работают по одной схеме: робот-манипулятор осуществляет позиционирование и перемещение исполнительного устройства, а само исполнительное устройство непосредственно выполняет вращательное движение при закручивании. Контроль усилия затяжки при этой схеме происходит двумя путями: либо по показаниям изменения параметров тока вращающего привода, либо по показаниям

силомоментного датчика, установленного в качестве переходного адаптера между фланцем робота-манипулятора и исполнительным устройством.

В качестве первого варианта устройства закручивания винтов с контролем усилия затяжки была предложена конструкция, в которой вращательное движение исполнительного устройства выполняется роботом-манипулятором за счет возможности бесконечного вращения оси A6 робота KUKA KR3 R540. Для контроля момента затяжки винтовых соединений применяется тензобалка. Так как исполнительное устройство вращается целиком, то возникла необходимость в предварительной обработке сигнала от тензобалки и дальнейшей его передаче по беспроводному интерфейсу в систему управления роботом.

На рис. 1 представлена схема исполнительного устройства.

На основании 1 динамометрической головки крепится один край тензобалки 2, микроконтроллер 3 с беспроводным модулем и аккумуляторная батарея 4. Второй конец тензобалки 2 закрепляется на крышке 5. Корпус 6 демпфера устанавливается на крышку 5. Благодаря пружине 7 держатель 8 и установленная в него бита 9 имеют свободный ход для компенсации погрешностей осевого перемещения.

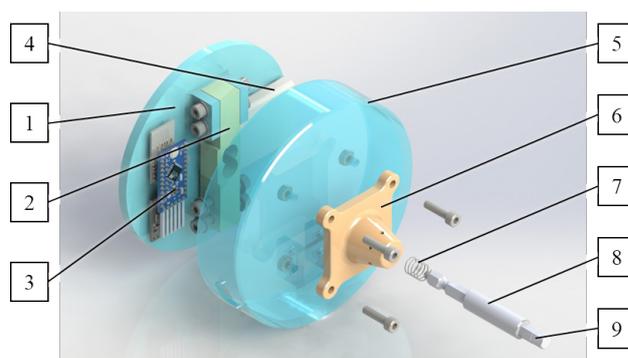


Рис. 1. Схема специального исполнительного устройства: 1 – основание, 2 – чувствительный элемент (балочный тензодатчик), 3 – аппаратная часть обработки и передачи данных, 4 – аккумулятор, 5 – крышка, 6 – корпус демпфера, 7 – пружина демпфирующая, 8 – держатель биты, 9 – сменная шестигранная бита

Fig. 1. Model of a special actuator: 1 – base, 2 – sensor (beam strain gauge), 3 – hardware for data processing and transmission, 4 – battery, 5 – cover, 6 – damper body, 7 – spring damper, 8 – bit holder, 9 – replaceable hex bit

⁷VS Inc. Drive Pro-Fuse Screw Tape Feeder. Режим доступа: <http://www.hp-vanguard.com/> (дата обращения: 28.06.2023).

⁸Electric screwdriver general catalog. Режим доступа: https://static.hios.com/catalog/HIOS_General-Catalog_22A_EN.pdf (дата обращения: 30.06.2023).

Реализованный прототип устройства затяжки представлен на фотографии рис. 2.

На рис. 3 представлена функциональная схема роботизированного комплекса сборки винтовых соединений с контролем усилия затяжки. На схеме можно выделить: робот-манипулятор KUKA KR3 R540 с контроллером робота, беспроводную передающую часть с датчиком усилия, установленную на фланце

робота, беспроводную принимающую часть с контроллером, соединенную по USB с управляющим компьютером и, по дополнительному интерфейсу входных сигналов, с контроллером робота. С управляющего компьютера устанавливаются предельно допустимые значения срабатывания датчика, а также принимаются данные о текущем значении крутящего момента.



Рис. 2. Прототип специального исполнительного устройства, установленный на роботе KUKA KR3 R540
Fig. 2. Prototype of a special actuator installed on the KUKA KR3 R540 robot



Рис. 3. Функциональная схема роботизированного устройства сборки винтовых соединений
Fig. 3. Function block diagram of a robotic device for screw connection assembly

В качестве чувствительного элемента для определения усилий затяжки крепежных изделий использовалась консольная тензометрическая балка с аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) НХ711. Данные с выхода АЦП поступают на микроконтроллер Arduino Pro Mini с частотой 80 Гц, где предварительно обрабатываются. Передача данных об усилии затяжки организована радиомодулями NRF24L01. Они обеспечивают быструю и качественную радиосвязь в заданных условиях эксплуатации, а также позволяют получать данные с радиоканала несколькими устройствами одновременно. Задержки радиопередачи составляют 10–15 мс, что меньше по сравнению с Bluetooth-передатчиками – 30–50 мс.

На передающем модуле реализованы следующие режимы работы, которые индицируются соответствующей световой индикацией:

1. Устройство запущено и ожидает



команды от стационарного микроконтроллера для установки предельных значений момента затяжки – разноцветная переливающаяся подсветка.

2. Устройство получило предельные значения момента и готово к переходу в режим трансляции текущего значения с тензобалки – белый цвет.

3. Устройство транслирует текущие значения с тензодатчика, данные значения меньше предельных – зеленый цвет.

4. Значение крутящего момента больше установленного предела – красный цвет.

Полученные по радиоканалу данные обрабатываются микроконтроллером Arduino Nano. При достижении предельных значений усилий затяжки на цифровой вход системы управления робота-манипулятора через гальваническую развязку подается сигнал.

Блок-схемы работы вышеописанных систем представлены на рис. 4.

После подачи питания беспроводное



Рис. 4. Блок-схемы алгоритмов разработанных систем: а – чувствительный элемент с передатчиком и индикацией; б – приемник, связанный с роботом-манипулятором
Fig. 4. Block diagrams of developed system algorithms: a – sensor with transmitter and indication; b – receiver connected to a manipulator robot

исполнительное устройство ожидает команды инициализации параметров (рис. 4 а). Команда поступает через приемник, связанный с контроллером робота от внешнего управляющего компьютера. Если инициализация прошла успешно, то от управляющего компьютера ожидается команда начала считывания данных с тензобалки и их отправки на приемник, связанный с контроллером робота. При поступлении данной команды беспроводной передатчик в исполнительном устройстве в циклическом режиме отправляет текущее значение усилия на тензобалке. В ходе циклической отправки выполняется вычисление момента, три последних значения которого сохраняются для определения среднего момента. Значение среднего момента сопоставляется с предельным, и в случае его превышения световая индикация устройства изменит цвет на красный.

При включении питания приемника, связанного с роботом-манипулятором, происходит инициализация начальных параметров (рис. 4 б). Затем проверяется, было ли установлено новое значение предельного момента со стороны управляющего компьютера. Если значение изменилось, то соответствующая информация отправляется на контроллер, расположенный на исполнительном устройстве. Далее в режиме бесконечного цикла происходит прием данных, вычисление на их основе момента, сохранения трех последних значений, вычисление по ним среднего момента и его сопоставление с предельным. В случае превышения предельного значения момента происходит отправка стоп-сигнала в контроллер робота. Условием выхода из данного цикла является нажатие кнопки выключения.

Для реализации циклов закручивания/выкручивания винтов на работе с помощью языка Kuka Robot Language (KRL) были разработаны алгоритмы, представленные на рис. 5.

На рис. 5 а показан алгоритм главной программы, в которой основная часть выполнена в виде цикла, в котором винт выкручивается из i -го отверстия и вкручивается в $i+1$ отверстие. При этом в начале цикла выполняется поиск шлицов головки винта с помощью биты, установленной в устройство робота. Если зацепление шлицов головки винта и биты не произошло (и было превышено значение крутящего момента), то поиск повторяется заново, при этом исполнительное устройство в начале цикла поворачивается на 90° .

На рис. 5 б приведен алгоритм выкручивания винтов. Выкручивание начинается с включения отслеживания прерывания, чтобы программа могла останавливать процесс в моменты превышения предельно допустимых значений усилий. Срабатывание прерывания на стадии «Поиск головки винта» свидетельствует о неудачной попытке, и дальнейшая часть алгоритма не выполняется, управление передается на вышестоящий уровень, в котором происходит изменение начального состояния и запуск повторной попытки. При удачном нахождении головки винта выполняются следующие процедуры «Медленное выкручивание...», «Разгон...», «Основной цикл выкручивания...», «Замедление...». После всех процедур выполняется отключение отслеживания прерываний.

Алгоритм цикла вкручивания винта (рис. 5 с) похож на ранее описанный цикл выкручивания, однако он не содержит поиска винта, т.к. винт уже находится на бите устройства. Следует выделить процедуру затяжки, которая выполняется до срабатывания прерывания, что свидетельствует о благополучном выполнении задачи.

В алгоритмах выкручивания (рис. 5 б) и вкручивания (рис. 5 с) имеются следующие процедуры, при выполнении которых срабатывание прерываний свидетельствует об аварийной ситуации: «Медленное выкручивание/вкручивание...», «Разгон...», «Основной цикл выкручивания/вкручивания...», «Замедление...». Срабатывание прерывания в процедурах «Поиск головки» и «Затягивание винта до предельного момента» является нормальным и не вызывает остановку программы.

На рис. 5 д представлен алгоритм обработки прерываний, вызываемый при достижении заданного значения момента. Вначале происходит остановка всех движений робота, далее отключается отслеживание прерываний. Так как существует определенная задержка между срабатыванием прерывания и фактической остановкой, то следующим шагом является перемещение в точку срабатывания прерывания. Чтобы идентифицировать ситуацию срабатывания прерывания (является ли она аварийной или штатной), в процедуре «Определение стадии закручивания/выкручивания винта» происходит вычисление предельных координат исполнительного звена, соответствующих положениям начала и конца вкручивания винта, начала затяжки,

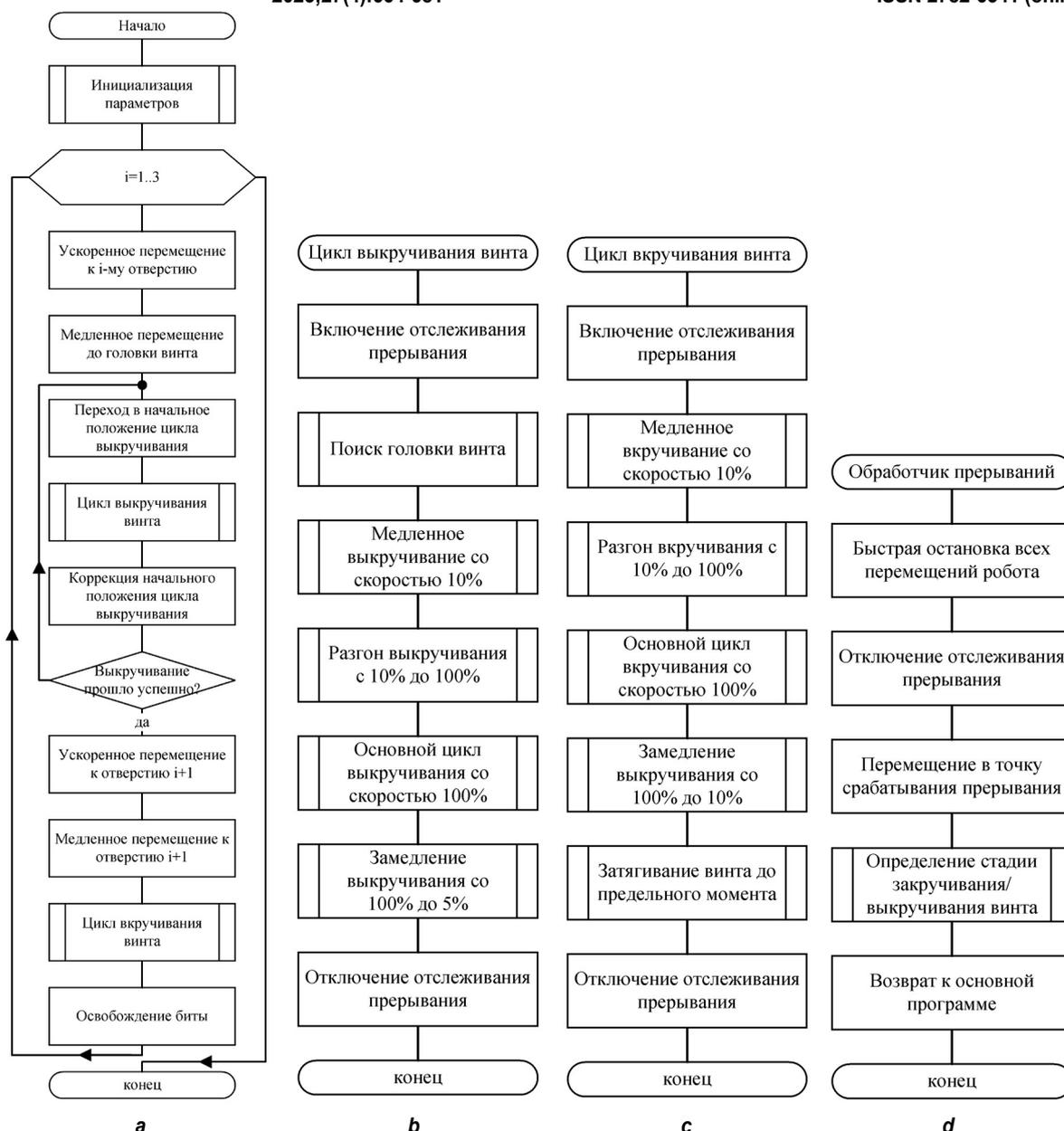


Рис. 5. Блок-схемы алгоритмов работы робота (a, b, c, d)
Fig. 5. Block diagrams of robot operation algorithms (a, b, c, d)

начала и конца поиска головки (при выкручивании).

Из-за погрешностей изготовления устройства существует эксцентриситет между осью вращения робота АБ и осью биты-винта (рис. 6).

Для компенсации этого эксцентриситета, после монтажа устройства на роботе, производились измерение фактического положения вершины инструмента биты относительно центральной точки фланца робота и программирование вращения с помощью команды относительного перемещения в системе координат инструмента. Вращение осуществлялось итерационно на треть оборота (т.е. угловой шаг – 120°, а линейное перемещение биты – треть шага резьбы). Направления вращения и линейного перемещения определяются двумя

соответствующими переменными DIR_A и DIR_Z. Для предотвращения остановок между шагами использовалась команда сглаживания перемещения C_DIS.

Процесс завинчивания разделяется на три этапа (рис. 6 b): 1 – наживление (медленный вход в резьбу, при котором достижение предельного значения момента будет являться аварийной ситуацией), 2 – завинчивание (основной цикл, происходит с максимальной скоростью, при которой событие превышения предельного момента также будет аварийной ситуацией), 3 – затяжка винта (медленное закручивание винта, при котором ожидается, что значение с датчика достигнет предельного момента).

Рассмотренное устройство плохо под-

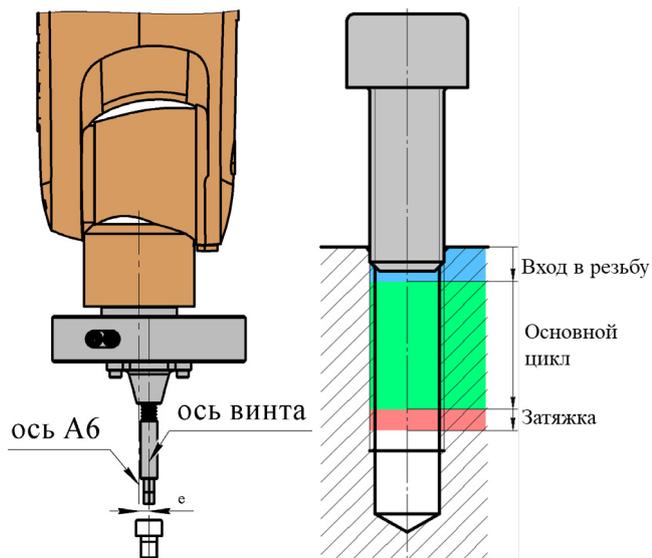


Рис. 6. Схема эксцентриситета между осью винта и осью А6 (а) и этапы закручивания винта (b)
 Fig. 6. Diagram of eccentricity between the screw axis and the A6 axis (a) and the stages of screw tightening (b)

ходит для промышленного использования, т.к. привод шестой оси робота при работе в таком режиме быстро исчерпает свой ресурс, а использование аккумулятора в качестве источника питания подразумевает его периодическую подзарядку. Данная проблема частично решена в работе [14], однако такой метод подходит не для всех режимов работы инструмента.

По этим причинам было разработано и изготовлено новое устройство (рис. 7). Устройство состоит из вращающейся сменной

биты 1, привода 2 вращения биты с контролем момента затягивания, рычажного захвата 3 и блока управления 4. При выполнении сборочной операции захват 3 берет собираемый модуль 5 с ложеента 6 и устанавливает его на базовую панель 7. Затем с помощью биты 1 из ложеента 6 захватывается винт, который фиксирует модуль 5 на базовой панели 7 с установленным моментом затяжки.

Для управления моментом затяжки и скоростью вращения необходимо независимо контролировать ток и напряжение на двигателе. Для этого применялась схема источника питания с прямоугольной характеристикой. Подобные схемы широко применяются в лабораторных источниках питания, где требуется раздельная настройка тока и напряжения [15].

Контроль момента затяжки винтовых соединений осуществляется за счет ограничения максимального тока двигателя. Управление двигателем и захватом осуществляет электронный блок управления. В настоящее время широко применяются методы теоретического определения зависимости момента от тока двигателя, в том числе с применением нейронных сетей, так в работе [16] рассматривается определение зависимости получаемого момента затяжки от геометрии двигателя. Однако в случае применения серийно выпускаемых двигателей такой расчет не представляется возможным. Также существуют методы, опирающиеся на экспериментальное

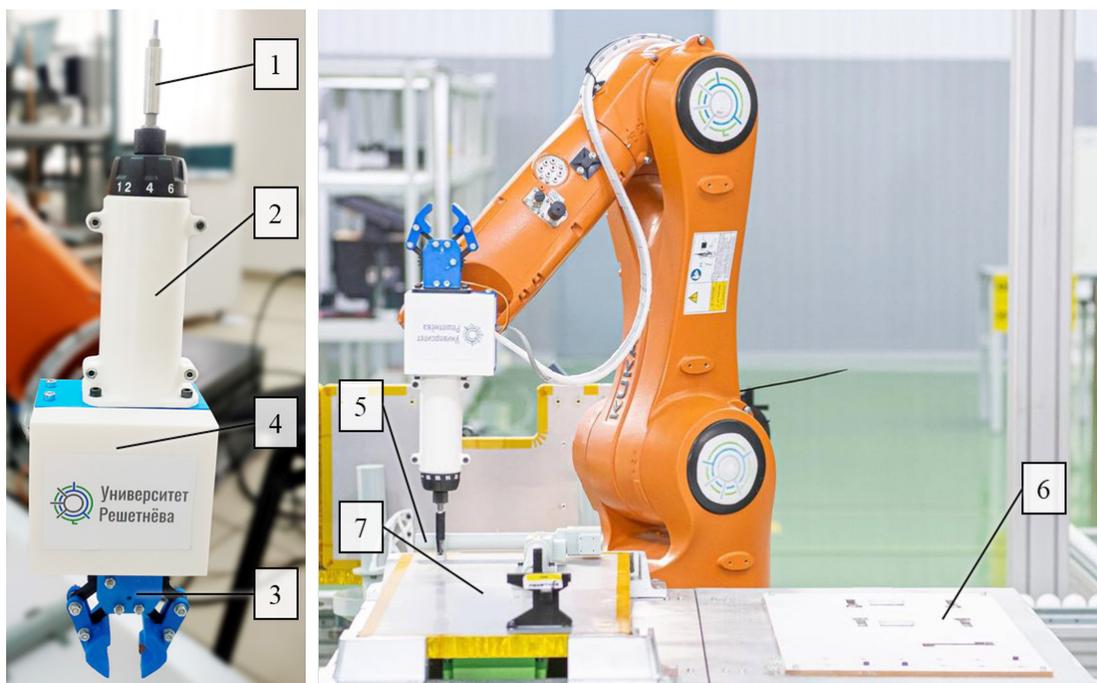


Рис. 7. Исполнительное устройство и роботизированный стенд для винтовой сборки изделий
 Fig. 7. Actuator and robotic test bench for screw assembly of work products

определение момента отворачивания винтов, составления табличной зависимости и последующей аппроксимации [17], однако это применимо только для серийных производств с высокой степенью унификации и фиксированным техпроцессом. Существуют исследования измерения момента в пневматическом инструменте⁹, однако такой принцип не позволяет сделать инструмент полностью беспроводным.

Благодаря отсутствию необходимости реализации безграничного вращения оси А6 робота-манипулятора появилась возможность использовать проводную связь для передачи простых двоичных команд управления от системы управления роботом-манипулятором через гальваническую развязку. Цифровые входы и выходы на контроллере робота-манипулятора использовались следующим образом:

- один выход – для включения привода вращения биты;
- один выход – для управления направлением вращения привода вращения;
- два выхода – для выбора позиции раскрытия захвата (открыт/закрыт на 30%/закрыт на 60%/закрыт на 100%);
- один вход – для получения тактовых импульсов, соответствующих оборотам привода вращения.

Задание уставок на скорость вращения и на ограничение момента завинчивания винта по-прежнему выполняется по беспроводному

интерфейсу.

В качестве управляющего контроллера в электронном блоке управления применен модуль ESP32-CAM. На борту этого модуля есть двухмегапиксельная камера OV-2640, слот под карту памяти MicroSD и контроллер беспроводного интерфейса Wi-Fi. Также имеются выходы GPIO для подключения дополнительных устройств и сигналов.

В разработанном устройстве на этот модуль возложены следующие функции: задание уставки по максимальному току двигателя, задание уставки по напряжению двигателя, отслеживание направления вращения двигателя, измерение и обработка сигнала с датчика тока двигателя, измерение и обработка сигнала с датчика напряжения на двигателе, измерение и обработка сигнала с датчика оборотов двигателя, обработка команд управления с интерфейсов робота-манипулятора, управление сервомотором устройства захвата.

Для управления двигателем разработана схема импульсного преобразователя с прямоугольной вольт-амперной характеристикой. Преобразователь построен на ШИМ-контроллере TL494¹⁰ (широтно-импульсная модуляция), который управляет мостом на силовых MOSFET транзисторах, в диагональ которого включен коллекторный двигатель постоянного тока (рис. 8).

Применение мостовой схемы позволяет

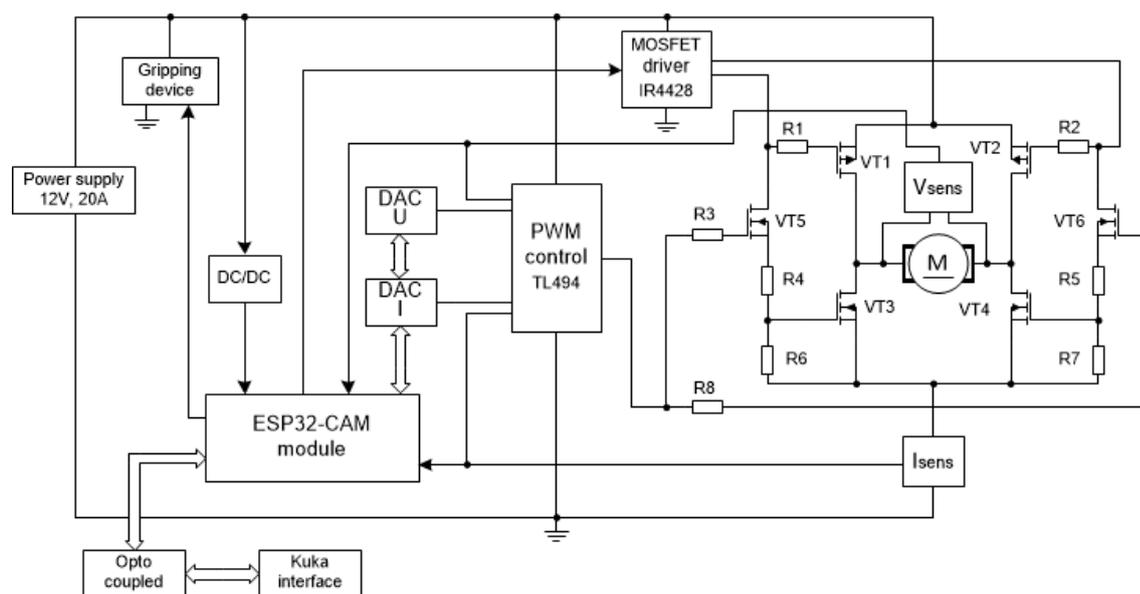


Рис. 8. Схема электронного блока управления
Fig. 8. Electronic control unit diagram

⁹Dacell TRB series torque sensors. Режим доступа: http://danaloadcell.com/portfolio_page/shaft-type-torque-sensors/?ckattempt=1 (дата обращения: 30.06.2023).

¹⁰TL494. Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/657/DOC027657782.pdf> (дата обращения: 30.06.2023).

реверсировать двигатель, изменяя только уровень логического сигнала на входе MOSFET драйвера.

Сигналы обратной связи с датчика тока и датчика напряжения замыкаются в схеме ШИМ управления, а модуль ESP32-CAM эти сигналы измеряет для контроля корректности работы устройства и передачи значений достигнутого момента затяжки на управляющий компьютер.

Для начала цикла завинчивания винта с робота-манипулятора должен прийти сигнал на включение привода вращения биты. В этот момент цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) по току уже выдает уставку, соответствующую требуемому моменту затяжки винта, а ЦАП по напряжению начинает плавно увеличивать свое выходное напряжение, тем самым обеспечивая плавный запуск привода вращения биты. Ближе к концу резьбы обороты двигателя уменьшаются путем понижения напряжения на выходе ЦАП по напряжению для уменьшения инерционной составляющей в итоговом моменте затяжки винта. На финальном цикле закручивания винта ток в двигателе начинает возрастать, соответственно, увеличивается сигнал обратной связи по току двигателя, и при достижении им уставки с ЦАП по току схема ШИМ управления начинает поддерживать этот уровень тока путем снижения напряжения на двигателе, что приводит к его остановке. Это состояние фиксирует модуль ESP32-CAM, убирает уставку с ЦАП по напряжению и вырабатывает сигнал на интерфейс робота-манипулятора о завер-

шении цикла завинчивания.

Для экспериментальной отработки устройства использовались определенные винты с известной длиной и шагом резьбы. Поэтому скорость вращения двигателя на каждом шаге цикла завинчивания была запрограммирована. Для реализации серийной сборки, где возможно применение винтов различной номенклатуры, планируется для определения требуемой циклограммы завинчивания использовать видеокамеру, которая уже установлена в модуле ESP32-CAM для распознавания меток, нанесенных на ложементы для винтов, в которых будут зашифрованы параметры винта, используемого в данном цикле.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В первом устройстве из-за наличия беспроводного интерфейса при передаче сигнала наблюдается некоторая задержка между достижением предельного значения момента и остановкой вращения робота. Для изучения задержки в ходе эксперимента было выполнено по пять циклов завинчивания винтов со скоростями 50, 75 и 100% от максимальной скорости.

Последовательность значений, передаваемых устройством затягивания, представлена в виде графиков на рис. 9–11 для разных скоростей закручивания. Красной линией на графиках показано значение установленного предельного момента.

По трем графикам видно, что значение

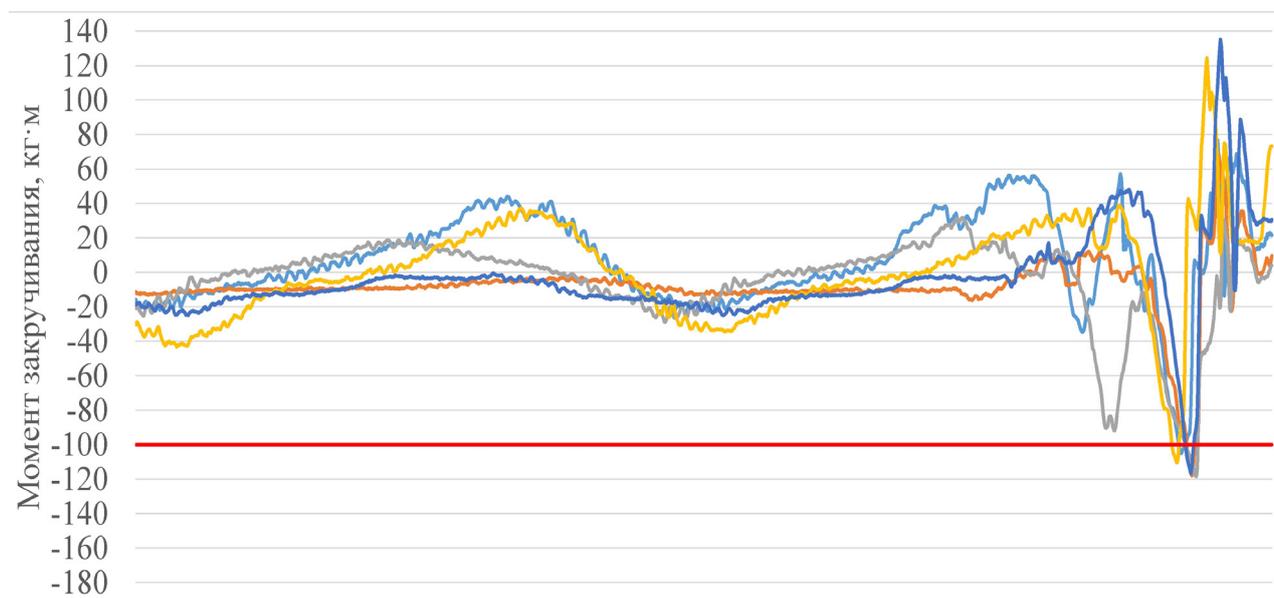


Рис. 9. Изменение значений момента при 50% скорости
Fig. 9. Changing torque values at 50% speed

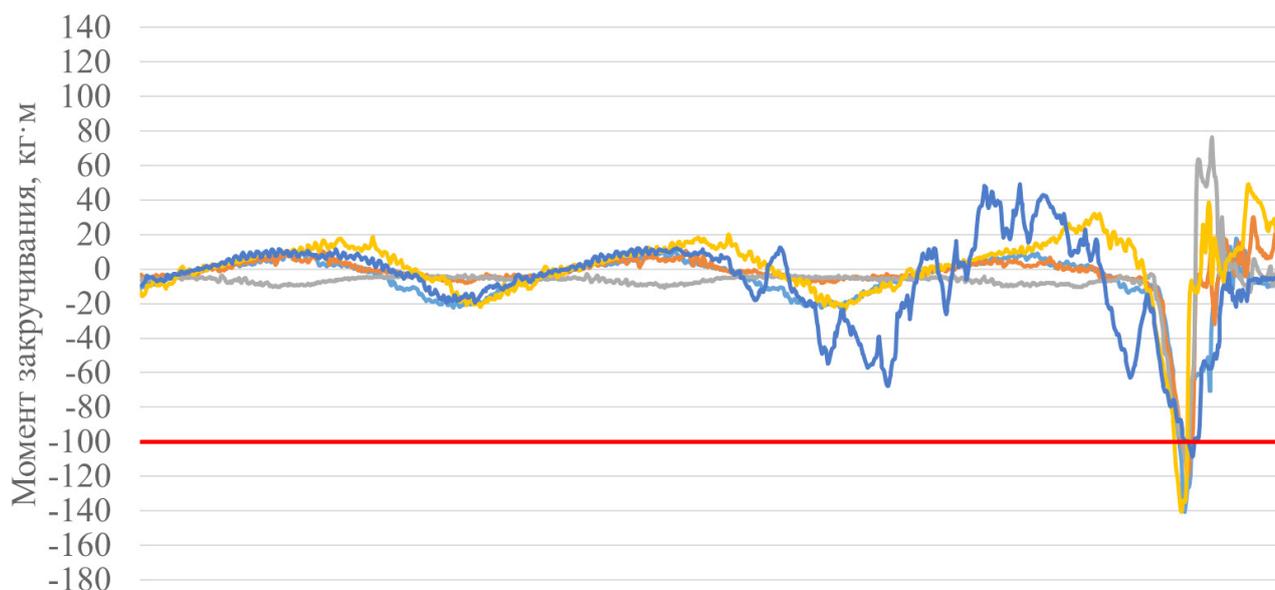


Рис. 10. Изменение значений момента при 75% скорости
Fig. 10. Torque values variation at 75% speed

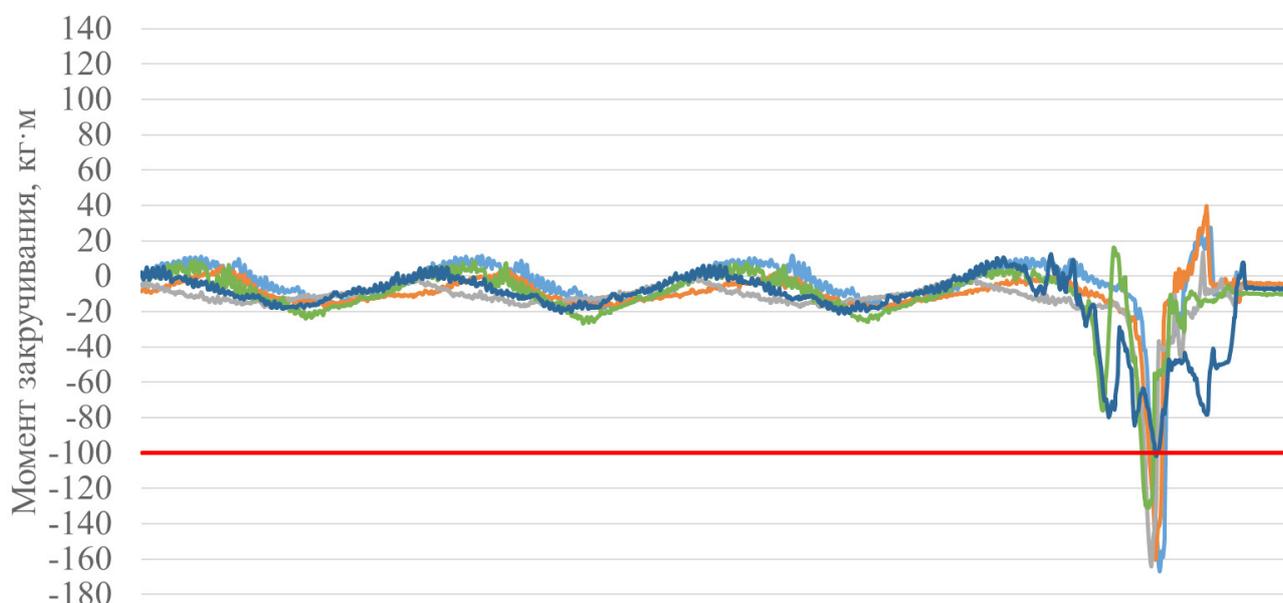


Рис. 11. Изменение значений момента при 100% скорости
Fig. 11. Torque values variation at 100% speed

максимального достигнутого момента увеличивается с ростом скорости закручивания. Если для каждого из экспериментов вынести максимальное значение достигнутого при закручивании момента в зависимости от скорости закручивания (рис. 12), то можно увидеть, что среднее значение по пяти экспериментам увеличивается с ростом скорости, также наблюдается увеличение разброса значений.

Для подтверждения существующей статистически значимой зависимости максимального момента от скорости закручивания был использован Н-Критерий Крускала-Уоллиса. Данный критерий предназначен для оценки различий одновременно между тремя и более

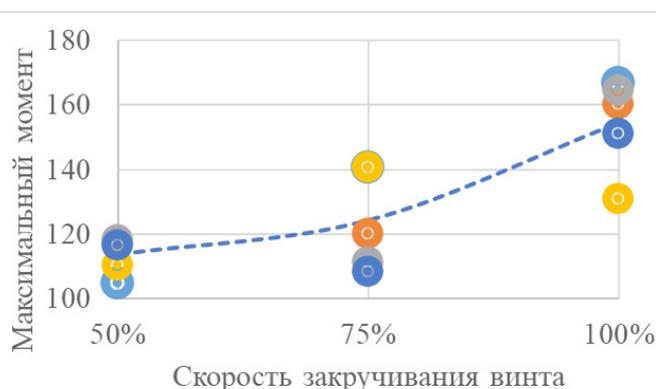


Рис. 12. Зависимость максимального момента от скорости закручивания
Fig. 12. Maximum torque vs tightening speed

Таблица 1. Обоснование различий в значениях достигнутого при закручивании момента по Н-Критерий Крускала-Уоллиса
Table 1. Justification of differences in values of the torque achieved during tightening according to the Kruskal-Wallis H test

№	Скорость закручивания					
	100%		75%		50%	
	Значение	Ранги (R1)	Значение	Ранги (R1)	Значение	Ранги (R1)
1	-166,91	15	-140,82	11	-104,89	1
2	-160,29	13	-120,06	8	-117,91	6
3	-164,38	14	-111,44	4	-118,3	7
4	-130,74	9	-140,58	10	-110,38	3
5	-151,01	12	-108,39	2	-116,64	5
$R_{\Sigma i}$	63		35		22	
$\frac{R_{\Sigma i}^2}{n_i}$	793,8		245		96,8	
$H_{эмп}$	8,78					
$H_{крит}$	$H_{эмп} (0,01) = 7,98, H_{крит} (0,05) = 5,78$					

выборками по уровню признака:

$$H_{эмп} = \frac{12}{N(N+1)} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{R_{\Sigma i}^2}{n_i} - 3(N+1) \quad (1)$$

где N – общее число членов в обобщенной выборке; n_i – число членов в каждой отдельной выборке; $R_{\Sigma i}^2$ – квадраты сумм рангов по каждой i -й выборке.

Значения промежуточных вычислений и итоговое значение критерия представлены в табл. 1.

Из табл. 1, видно, что по данному критерию различия между значениями максимального

крутящего момента, полученные для разных скоростей закручивания, являются значимыми.

Для подтверждения гипотезы о зависимости разброса максимального значения крутящего момента от скорости закручивания был использован также Н-Критерий Крускала-Уоллиса. Оценка проводилась по модулям отклонений, достигнутых при закручивании моментов от среднего значения для каждой скорости (табл. 2):

$$\Delta M_{\max i} (V\%) = \left| M_{\max \text{ ср}} (V\%) - M_{\max i} (V\%) \right| \quad (2)$$

Таблица 2. Обоснование различий в диапазонах достигнутого при закручивании момента по Н-Критерию Крускала-Уоллиса
Table 2. Justification of differences in the ranges of the torque achieved during tightening according to the Kruskal-Wallis H test

№	Скорость закручивания					
	100%		75%		50%	
	$\Delta M_{\max i}$	Ранги (R1)	$\Delta M_{\max i}$	Ранги (R1)	$\Delta M_{\max i}$	Ранги (R1)
1	12,244	10	16,562	14	8,734	8
2	5,624	7	4,198	4	4,286	5
3	9,714	9	12,818	11	4,676	6
4	23,926	15	16,322	13	3,244	2
5	3,656	3	15,868	12	3,016	1
$M_{\max \text{ ср}} (V\%)$	-154,666		-124,258		-113,624	
$R_{\Sigma i}$	44		54		22	
$\frac{R_{\Sigma i}^2}{n_i}$	387,2		583,2		96,8	
$H_{эмп}$	5,36					
$H_{крит}$	$H_{крит} (0,01) = 7,98, H_{крит} (0,05) = 5,78$					

где $M_{\max \text{cp}}(V_{\%})$ – среднее значение достигнутого момента при фиксированной скорости $V_{\%}$ (50, 75 и 100%); $M_{\max i}(V_{\%})$ – значение достигнутого момента i -го испытания при фиксированной скорости закручивания $V_{\%}$.

Результаты вычисления критерия показывают, что существующие различия между отклонениями достигнутого момента от среднего значения (разброс) для разных скоростей затягивания являются статистически незначимыми.

Для подтверждения гипотезы о зависимости среднего значения максимального момента от скорости закручивания был использован χ^2 -критерий Пирсона:

$$\text{эмп2} = (M_{\max \text{cp}}(V_{\%}) - M_{\max \text{cp}}) \cdot 2M_{\max \text{cp}}, \quad (3)$$

где $M_{\max \text{cp}}$ – среднее значение достигнутого момента при закручивании, по всем значениям.

Результаты вычисления χ^2 -критерия Пирсона показывают, что среднее значение достигнутого момента, возможно, имеет статистически значимые различия при разных

скоростях закручивания, но для выявления статистической значимости требуется дополнительное исследование.

Для второго устройства экспериментальные исследования момента затягивания проводились на макете, представленном на рис. 13. Установка запитывалась от источника питания Power DC модель S-150-12 (на рис. 13 не показан). Для измерения момента на валу привода 1 использовался преобразователь 2 TRB-5K [18], выходной вал которого был зафиксирован и измерялся статический момент затяжки. Сигнал с преобразователя 2 через модуль 3 ввода-вывода поступал в шасси 4 с модулем сбора данных. Интерпретированная информация передавалась в ноутбук 5.

В ходе эксперимента напряжение на двигателе и ток задаются независимо при помощи двух ЦАП. Целью исследования было изучить фактическую зависимость момента на двигателе от тока и от напряжения.

Графики статического момента затяжки при постоянном ограничении тока и меняющемся напряжении показаны на рис. 14.

Таблица 3. Обоснование различий в средних значениях достигнутого при закручивании момента по χ^2 -критерий Пирсона
Table 3. Justification of differences in the average values of the torque achieved during tightening according to Pearson's chi-squared test (χ^2)

$V_{\%}$	$M_{\max \text{cp}}(V_{\%})$	$M_{\max \text{cp}}$	$\frac{(M_{\max \text{cp}}(V_{\%}) - M_{\max \text{cp}})^2}{ M_{\max \text{cp}} }$	χ^2
100%	-154,666	-130,849	4,335	$\chi^2_{\text{амп}} = 6,935$ $\chi^2_{\text{амп}}(0,01) = 9,21$ $\chi^2_{\text{амп}}(0,05) = 5,991$
75%	-124,258	-130,849	0,332	
50%	-113,624	-130,849	2,268	

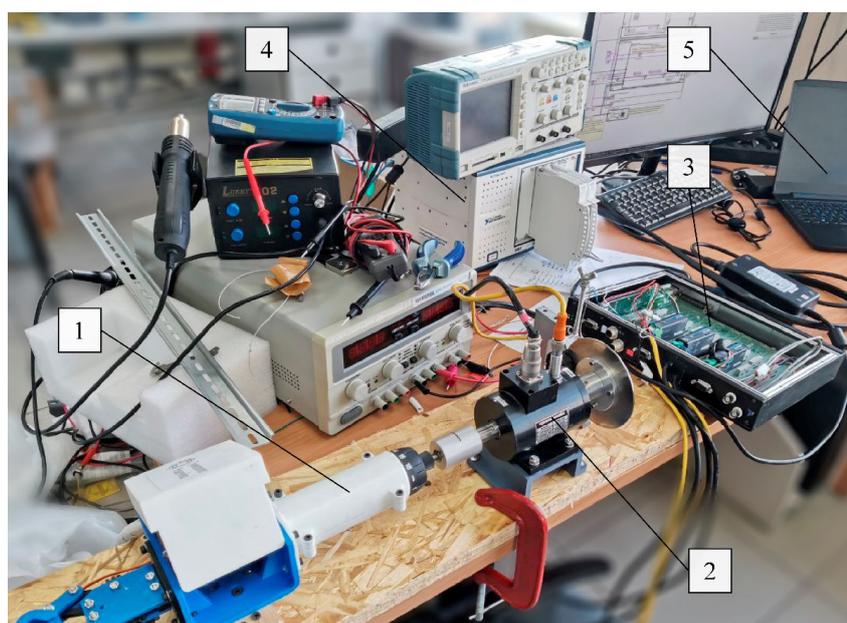


Рис. 13. Экспериментальный стенд исследования момента затяжки
Fig. 13. Experimental test bench to study the tightening torque

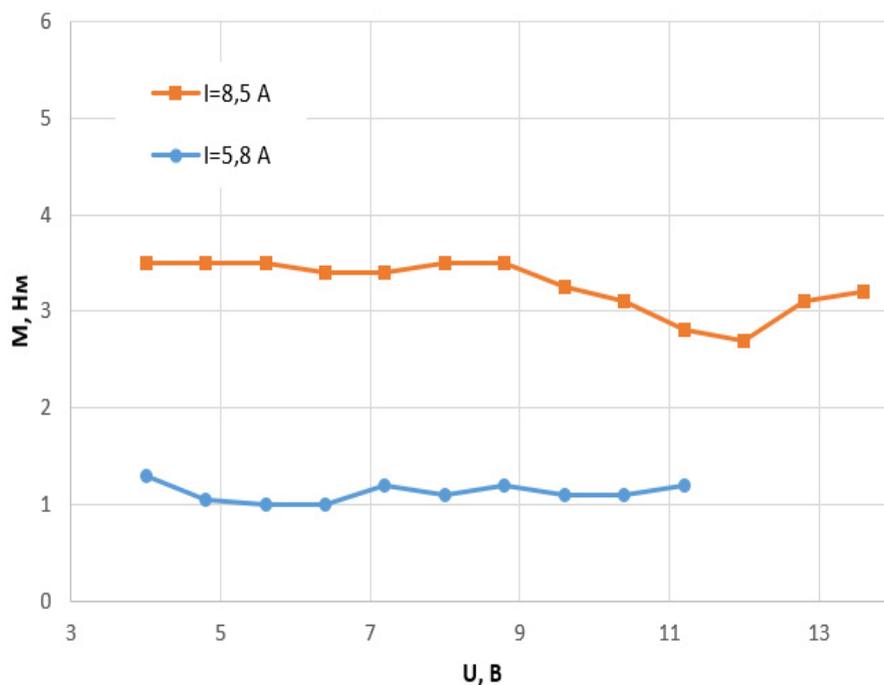


Рис. 14. Зависимость статического момента затяжки от напряжения при постоянном токоограничении
 Fig. 14. Static tightening torque vs voltage under constant current limiting

Из рис. 14 видно, что при постоянном токоограничении изменение напряжения на двигателе практически не влияет на выдаваемый момент. Небольшие отклонения, вероятнее всего, вызваны изменением КПД двигателя, который максимален на низких оборотах (соответствует меньшему значению напряжения) и уменьшается на высоких (соответствует высокому значению напряжения).

Графики достигнутого момента затяжки при постоянном напряжении и различных значениях тока показаны на рис. 15.

Из рис. 15 видно, что момент зависит только от уровня токоограничения с практически линейной зависимостью (зеленый график).

На рис. 16 приведен график погрешности момента затяжки от линейной аппроксимации.

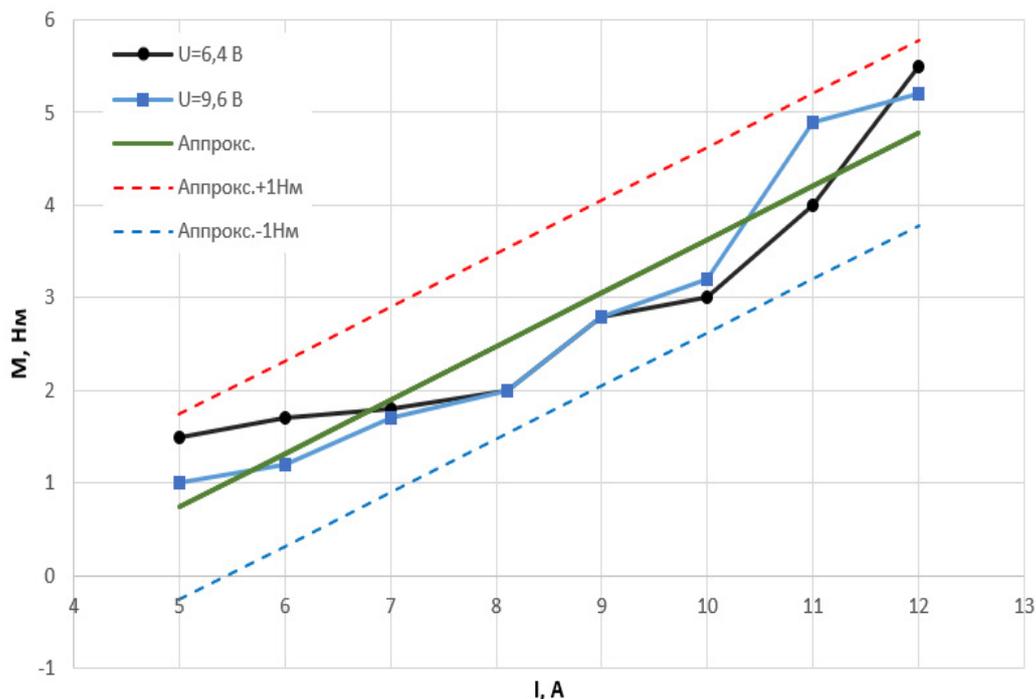


Рис. 15. Зависимость статического момента затяжки от токоограничения при постоянном напряжении
 Fig. 15. Static tightening torque vs current limiting at constant voltage

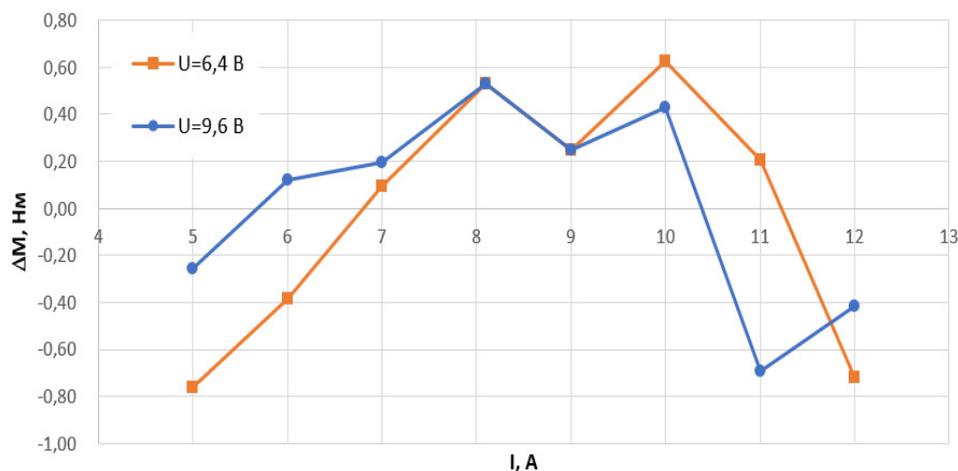


Рис. 16. Погрешность задания момента затяжки при использовании линейной аппроксимации
Fig. 16. Error in tightening torque setting when using linear approximation

Из рис. 16 видно, что абсолютная погрешность задания момента затяжки не превышает 0,8 Н·м во всем диапазоне или 3,03% (приведенная относительно максимального значения момента 25 Н·м). Данный результат сопоставим с погрешностью 4%, полученной в работе [19], и меньше, чем 2 Н·м, полученные в эксперименте [20].

Полученные результаты показывают, что представленные схемотехническое решение и зависимость могут быть использованы для реализации инструмента с контролируемым моментом затяжки. Применение цифрового управления позволяет производить затяжку в несколько этапов – вначале ограничиваясь небольшими значениями момента на этапе завинчивания резьбы, затем устанавливая точное значение момента на этапе затяжки.

При этом также возможна реализация дополнительных функций – аварийной остановки при закусывании резьбы, контроль центровки винтового соединения и т.п., что планируется к реализации в серийной версии устройства затяжки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в статье система автоматизированной сборки изделий роботом-манипулятором с динамометрическим контролем процесса затягивания винтовых соединений позволяет дополнить функционал робота-манипулятора интеллектуальными функциями для обеспечения обратной связи в процессе сборки и реализации контроля винтовых соединений.

Система обеспечивает погрешность контроля, соответствующую современным стандартам, и позволяет автоматизировать операции, прежде выполняемые рабочими, сокращая количество необходимого времени и повышая качество сборки.

В дополнение к автоматизации могут обеспечиваться функции телеметрии в реальном времени, записи журналов сборки, включая подробные графики затяжки каждого соединения, что может быть использовано в сборочных линиях, реализующих идеологию цифровых двойников.

Список источников

1. Hsue Albert Wen-Jeng, Tsai Chih-Fan. Torque controlled mini-screwdriver station with a SCARA robot and a machine-vision guidance // International Symposium on Computer, Consumer and Control (Taichung City, 13–16 November 2020). Taichung City: IEEE, 2020. P. 465–468. <https://doi.org/10.1109/IS3C50286.2020.00127>.
2. Hwang Joo-Yeon, Jung Doo-Hee, Roh Young-Jun, Nam Kee-Jun, Hwang Dal-Yeon. Low-cost automatic screw machine using a commercial electric screwdriver // 12th International Conference on Control, Automation and Systems (Jeju, 17–21 October 2012). Jeju: IEEE, 2012. P. 1055–1060.
3. Wu Zhimin, Du Wenjuan, Zhang Guigang, Wang Jian. Fuzzy control based on torque and angle method for bolt assembling system // Prognostics and Health Management Conference (Besancon, 4–7 May 2020). Besancon: IEEE, 2020. P. 214–218. <https://doi.org/10.1109/PHM-Besancon49106.2020.00042>.
4. Мубаракшин Р.М., Мубаракшин М.Р., Сотников П.С. Адаптивное управление и автоматизация процессов обработки деталей с целью обеспечения требуемых эксплуатационных показателей ответственных узлов и машин в

производстве 4.0 // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 4. С. 3–10. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-4-3-10>.

5. Яковлева Е.А., Моторкин А.С., Капустин Д.Р. Выбор системы роботизированной автоматизации процессов на производстве // *SAEC*. 2023. № 3. С. 357–362. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id23-499>.

6. Hu Kaixiang, Cao Qixin, Zhang Haoruo. A compliant robotic assembly system based on multiple sensors // *IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts*. 2016. <https://doi.org/10.1109/ARSO.2016.7736259>.

7. Matsuno T., Huang J., Fukuda T. Fault detection algorithm for external thread fastening by robotic manipulator using linear support vector machine classifier // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2013. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6631058>.

8. Li Zexiang. Robotics research for 3C assembly automation. Режим доступа: <https://app.box.com/s/zcg8qqxt6fw6v4xz22h6> (дата обращения: 28.06.2023).

9. Трифонов А.С. Разработка робототехнического комплекса для сборки изделий с применением резьбовых соединений // *BE FIRST: сб. ст. Междунар. науч.-исследовательского конкурса (г. Пенза, 15 сентября 2021 г.)*. Пенза: Наука и Просвещение, 2021. С. 16–21. EDN: FQHXCX.

10. Aivaliotis P., Michalos G., Makris S. Cooperating robots for fixtureless assembly: modelling and simulation of tool exchange process // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2018. Vol. 31. Iss. 12. P. 1235–1246. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1512011>.

11. Wang Rui, Guo Xiangyu, Li Songmo. Automatic assembly technology of dense small screws for flat panel parts // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Iss. 14. <https://doi.org/10.3390/app13148309>.

12. Pitipong S., Pornjit P., Watcharin P. An automated Four-DOF robot screw fastening using visual servo // *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*. 2010. <https://doi.org/10.1109/SII.2010.5708355>.

13. Zeng Fan, Xiao Juliang, Liu Haitao. Force/torque sensorless compliant control strategy for assembly tasks using a 6-DOF collaborative robot // *IEEE Access. Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 2019. Vol. 7. P. 108795–108805. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2931515>.

14. Volkov I., Makarov A., Kukhtik M. Research of magnetic supply unit of wireless torque sensor // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (Sochi, 16–20 May 2022)*. Sochi: IEEE, 2022. P. 874–879. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM54945.2022.9787209>.

15. Yuan Zhibao, Xu Haiping. Pulse power supply with faster response and low ripple current using inductive storage and interleaving technology // *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*. 2020. Vol. 5. Iss. 1. P. 54–62. <https://doi.org/10.24295/cpsstpea.2020.00005>.

16. Aoyagi T., Otomo Y., Igarashi H., Sasaki H., Hidaka Y., Arita H. Prediction of current-dependent motor torque characteristics using deep learning for topology optimization // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2022. Vol. 58. No. 9. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3167254>.

17. Попов А.В., Чудинов В.А., Шаякбаров И.Э. Повышение качества контроля моментов затяжек резьбовых соединений методом отворачивания // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018. № 2. С. 315–322.

18. Lee Young Gu, Talluri Teresa, Chung Hee Tae. Development of impact wrench torque measurement system // *IEEE International Conference on Architecture, Construction, Environment and Hydraulics (Xiamen, 20–22 December 2019)*. Xiamen: IEEE, 2019. P. 33–36. <https://doi.org/10.1109/ICACEH48424.2019.9042104>.

19. Fan Xuewei, Wang Xiaowu, Xie Feng, Tang Nan. Research on control system of electric tightening wrench based on rotational speed difference method // *7th International Conference on Information, Cybernetics, and Computational Social Systems (Guangzhou, 13–15 November 2020)*. Guangzhou: IEEE, p. 797–801. <https://doi.org/10.1109/ICCSS52145.2020.9336824>.

20. Li Te, Liu Kuo, Tuo Guiben, Zhang Jiali, Ma Yue. Assemble torque measurement of aero-engine rotor blisk inside deep and confined cavity // *IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace (Turin, 19–21 June 2019)*. Turin: IEEE, 2019. P. 238–242. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869615>.

References

1. Hsue Albert Wen-Jeng, Tsai Chih-Fan. Torque controlled mini-screwdriver station with a SCARA robot and a machine-vision guidance. In: *International Symposium on Computer, Consumer and Control*. 13–16 November 2020, Taichung City. Taichung City: IEEE; 2020, p. 465–468. <https://doi.org/10.1109/IS3C50286.2020.00127>.

2. Hwang Joo-Yeon, Jung Doo-Hee, Roh Young-Jun, Nam Kee-Jun, Hwang Dal-Yeon. Low-cost automatic screw machine using a commercial electric screwdriver. In: *12th International Conference on Control, Automation and Systems*. 17–21 October 2012, Jeju. Jeju: IEEE; 2012, p. 1055–1060.

3. Wu Zhimin, Du Wenjuan, Zhang Guigang, Wang Jian. Fuzzy control based on torque and angle method for bolt assembling system. In: *Prognostics and Health Management Conference*. 4–7 May 2020, Besancon. Besancon: IEEE; 2020, p. 214–218. <https://doi.org/10.1109/PHM-Besancon49106.2020.00042>.

4. Mubarakshin R.M., Mubarakshin M.R., Sotnikov P.S. Adaptive control and automation of the workpiece machining

- processes in order to provide the required performance of critical components and machines in the industry 4.0 production. In: *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2019;4:3-10. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-4-3-10>.
5. Iakovleva E.A., Motorkin A.S., Kapustin D.R. Selecting a robotisation tool in manufacturing. *SAEC*. 2023;3:357-362. (In Russ.). <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id23-499>.
6. Hu Kaixiang, Cao Qixin, Zhang Haoruo. A compliant robotic assembly system based on multiple sensors. In: *IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts*. 2016. <https://doi.org/10.1109/ARSO.2016.7736259>.
7. Matsuno T., Huang J., Fukuda T. Fault detection algorithm for external thread fastening by robotic manipulator using linear support vector machine classifier. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2013. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6631058>.
8. Li Zexiang. Robotics research for 3C assembly automation. Available from: <https://app.box.com/s/zcg8qqxt6fw6v4xz22h6> [Accessed 28th June 2023].
9. Trifonov A.S. Development of a robotic complex for assembling products using threaded connections. In: *BE FIRST: sbornik statej Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa = BE FIRST: collected articles of the International scientific and research competition*. 15 September 2021, Penza. Penza: Nauka i Prosveshchenie; 2021, p. 16-21. EDN: FQHXCX.
10. Aivaliotis P., Michalos G., Makris S. Cooperating robots for fixtureless assembly: modelling and simulation of tool exchange process. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2018;31(12):1235-1246. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1512011>.
11. Wang Rui, Guo Xiangyu, Li Songmo. Automatic assembly technology of dense small screws for flat panel parts. *Applied Sciences*. 2023;13(14). <https://doi.org/10.3390/app13148309>.
12. Pitipong S., Pornjitt P., Watcharin P. An automated Four-DOF robot screw fastening using visual servo. In: *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*. 2010. <https://doi.org/10.1109/SII.2010.5708355>.
13. Zeng Fan, Xiao Juliang, Liu Haitao. Force/torque sensorless compliant control strategy for assembly tasks using a 6-DOF collaborative robot. *IEEE Access. Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 2019;7:108795-108805. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2931515>.
14. Volkov I., Makarov A., Kukhtik M. Research of magnetic supply unit of wireless torque sensor. In: *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 16–20 May 2022, Sochi. Sochi: IEEE; 2022, p. 874-879. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM54945.2022.9787209>.
15. Yuan Zhibao, Xu Haiping. Pulse power supply with faster response and low ripple current using inductive storage and interleaving technology. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*. 2020;5(1):54-62. <https://doi.org/10.24295/cpsstpea.2020.00005>.
16. Aoyagi T., Otomo Y., Igarashi H., Sasaki H., Hidaka Y., Arita H. Prediction of current-dependent motor torque characteristics using deep learning for topology optimization. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2022;58(9):1-4. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3167254>.
17. Popov A.V., Chudinov V.A., Shayakbarov I.E. Improving control quality of tightening torques of threaded connections by the unscrewing method. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. = Proceedings of the Tula State University. Engineering Sciences*. 2018;2:315-322. (In Russ.).
18. Lee Young Gu, Talluri Teressa, Chung Hee Tae. Development of impact wrench torque measurement system. In: *IEEE International Conference on Architecture, Construction, Environment and Hydraulics*. 20–22 December 2019, Xiamen. Xiamen: IEEE; 2019, p. 33-36. <https://doi.org/10.1109/ICACEH48424.2019.9042104>.
19. Fan Xuewei, Wang Xiaowu, Xie Feng, Tang Nan. Research on control system of electric tightening wrench based on rotational speed difference method. In: *7th International Conference on Information, Cybernetics, and Computational Social Systems*. 13–15 November 2020, Guangzhou. Guangzhou: IEEE; p. 797-801. <https://doi.org/10.1109/ICC52145.2020.9336824>.
20. Li Te, Liu Kuo, Tuo Guiben, Zhang Jiali, Ma Yue. Assemble torque measurement of aero-engine rotor blisk inside deep and confined cavity. In: *IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace*. 19–21 June 2019, Turin. Turin: IEEE; 2019, p. 238-242. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869615>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Пикалов Яков Юрьевич,

к.т.н., ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Робототехнические системы», Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнёва, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты Красноярский рабочий, 31, Россия
✉ yapibest@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7171-8154>

Yakov Yu. Pikalov,

Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher of the Robotic Systems Research Laboratory,
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
31, Krasnoyarsky Rabochy pr., Krasnoyarsk 660037, Russia
✉ yapibest@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7171-8154>

Штабель Николай Владимирович,
научный сотрудник научно-исследовательской
лаборатории «Робототехнические системы»,
Сибирский государственный университет науки и
технологий им. акад. М.Ф. Решетнёва,
660037, г. Красноярск, просп. им. газеты
Красноярский рабочий, 31, Россия
shtabnik@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-4373-4754>

Nikolay V. Shtabel,
Researcher of the Robotic Systems Research Laboratory,
Reshetnev Siberian State University of Science and
Technology,
31, Krasnoyarsky Rabochy pr., Krasnoyarsk 660037, Russia
shtabnik@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-4373-4754>

Брунгардт Максим Валерьевич,
к.т.н., доцент,
научный сотрудник научно-исследовательской
лаборатории «Робототехнические системы»,
Сибирский государственный университет науки и
технологий им. акад. М.Ф. Решетнёва,
660037, г. Красноярск, просп. им. газеты
Красноярский рабочий, 31, Россия
maxbrung@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4288-2550>

Maxim V. Brungardt,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Researcher of the Robotic Systems Research Laboratory,
Reshetnev Siberian State University of Science and
Technology,
31, Krasnoyarsky Rabochy pr., Krasnoyarsk 660037, Russia
maxbrung@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4288-2550>

Ткачёв Степан Борисович,
научный сотрудник научно-исследовательской
лаборатории «Робототехнические системы»,
Сибирский государственный университет науки и
технологий им. акад. М.Ф. Решетнёва,
660037, г. Красноярск, просп. им. газеты
Красноярский рабочий, 31, Россия
steep_st@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5749-6324>

Stepan B. Tkachev,
Researcher of the Robotic Systems Research Laboratory,
Reshetnev Siberian State University of Science and
Technology,
31, Krasnoyarsky Rabochy pr., Krasnoyarsk 660037, Russia
steep_st@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5749-6324>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 02.10.2023 г.;
одобрена после рецензирования 23.10.2023 г.;
принята к публикации 11.11.2023 г.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 02.10.2023;
approved after reviewing 23.10.2023;
accepted for publication 11.11.2023 .



Научная статья
УДК 629.113
EDN: OFPYHH
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-682-693

Разработка способа обеспечения стабильности процесса торможения путём совершенствования конструкции тормозных механизмов

П.А. Поляков^{1✉}

¹ Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия

Резюме. Цель – создание способа обеспечения стабильности и эффективности процесса торможения путем дифференциации фрикционных накладок тормозных колодок дисковых тормозных механизмов колодочного типа. В исследованиях применялась дифференциация времени взаимодействия пар трения и их площади, обеспечивающего наибольшие показатели стабильности тормозных механизмов. В работе применялись разработанные автором нестандартизированное стендовое оборудование и сегментарные тормозные механизмы, обеспечивающие дифференциацию пар трения по площади. Используя взаимосвязь между поперечным перемещением колодок и развиваемым тормозным моментом фрикционного узла, был разработан способ построения результирующего тормозного момента. В результате стендовых испытаний коэффициенты стабильности и колебания тормозного момента разработанных дисковых тормозных механизмов колодочного типа с шестью прижимающими элементами увеличились на 12,2 и 34,9%. Данные значения получены в сравнении с серийными тормозными механизмами, оснащенными моноприжимающим механизмом с единой тормозной колодкой. Расхождения между моделируемыми и полученными данными в ходе стендового эксперимента по критериям стабильности составили в среднем: по коэффициентам стабильности и колебания тормозного момента для рассматриваемых трех вариантов тормозных механизмов 5,1 и 6,7% соответственно. Дифференциация прижимающих элементов и сегментирование тормозных колодок оказывает эффект увеличения критериев стабильности и эффективности торможения для дисковых тормозных механизмов колодочного типа. Анализ зависимости поперечного перемещения и развиваемого тормозного момента позволил моделировать гарантированный результат по критерию стабильности и колебания тормозного момента дисковых тормозных механизмов колодочного типа. Аprobация проведенных стендовых испытаний дала возможность утверждать, что разработанная модель получения результирующего тормозного момента для тормозного механизма с сегментными колодками может использоваться для проектирования пар трения с закладываемыми параметрами.

Ключевые слова: тормозной механизм, прижимающий элемент, дифференциация, сегментная тормозная колодка, коэффициенты стабильности, колебания тормозного момента

Для цитирования: Поляков П.А. Разработка способа обеспечения стабильности процесса торможения путём совершенствования конструкции тормозных механизмов // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 682–693. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-682-693>. EDN: OFPYHH.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Developing the method ensuring stable braking via advanced design of braking devices

Pavel A. Polyakov^{1✉}

¹ Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Abstract. The aim is to develop a method for ensuring the stability and efficiency of the braking process by differentiating the friction linings of brake pads of pad-type disc braking mechanisms. The research applied differentiation of the interaction time of friction pairs and their area, which provides the highest stability indicators of braking mechanisms. The non-

standardized bench equipment developed by the author, as well as segmental braking mechanisms providing differentiation of friction pairs by area were used in the study. A method of designing the resultant braking torque was developed using the relationship between the transverse movement of the pads and the developed braking torque of the friction unit. As a result of bench tests, the stability and fluctuation coefficients of the braking torque of the developed pad-type disc brake mechanisms with six pressing elements increased by 12.2 and 34.9%. These values were obtained as compared to serial brake mechanisms equipped with a monopressing mechanism with a single brake pad. The discrepancies between the simulated and obtained data during the bench test on the stability criteria averaged 5.1 and 6.7% for the stability coefficients and braking torque fluctuations for the three brake mechanism variants under consideration, respectively. Differentiation of pressing elements and segmentation of brake pads has the effect of increasing the stability criteria and braking efficiency for pad-type disc brakes. With the analysis of the dependence of the transverse displacement and the developed braking torque, a guaranteed result on the stability criterion and braking torque fluctuations of pad-type disc brakes was modeled. Based on the conducted bench tests, the model developed for obtaining the resultant braking torque for the braking mechanism with segmental pads can be used for designing friction pairs with the set parameters.

Keywords: brake mechanism, clamping element, differentiation, segmented brake pad, stability coefficients, braking torque fluctuations

For citation: Polyakov P.A. Developing the method ensuring stable braking via advanced design of braking devices. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):682-693. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-682-693>. EDN: OFPYHH.

ВВЕДЕНИЕ

Современные дисковые тормозные механизмы колодочного типа оснащаются различными типами прижимающих механизмов, в зависимости от отрасли их применения (рис. 1 а, б). Дисковые тормозные механизмы колодочного типа непосредственного действия в основном устанавливаются на автотранспортных средствах, что обеспечивает им быстрое действие и сравнительно небольшой по модулю тормозной момент. Тормозные механизмы, оснащенные передаточным меха-

низмом, используются в подвижном составе железнодорожного транспорта, что позволяет увеличить величину тормозного момента за счет больших значений прижимающих сил. Увеличение модуля тормозного момента является мерой эффективности тормозных механизмов, но помимо нее другим критерием эффективности работы выступает характеристика стабильности тормозного момента во времени процесса торможения.

Изменение критерия тормозного момента во временном лаге обусловлено за счет дис-

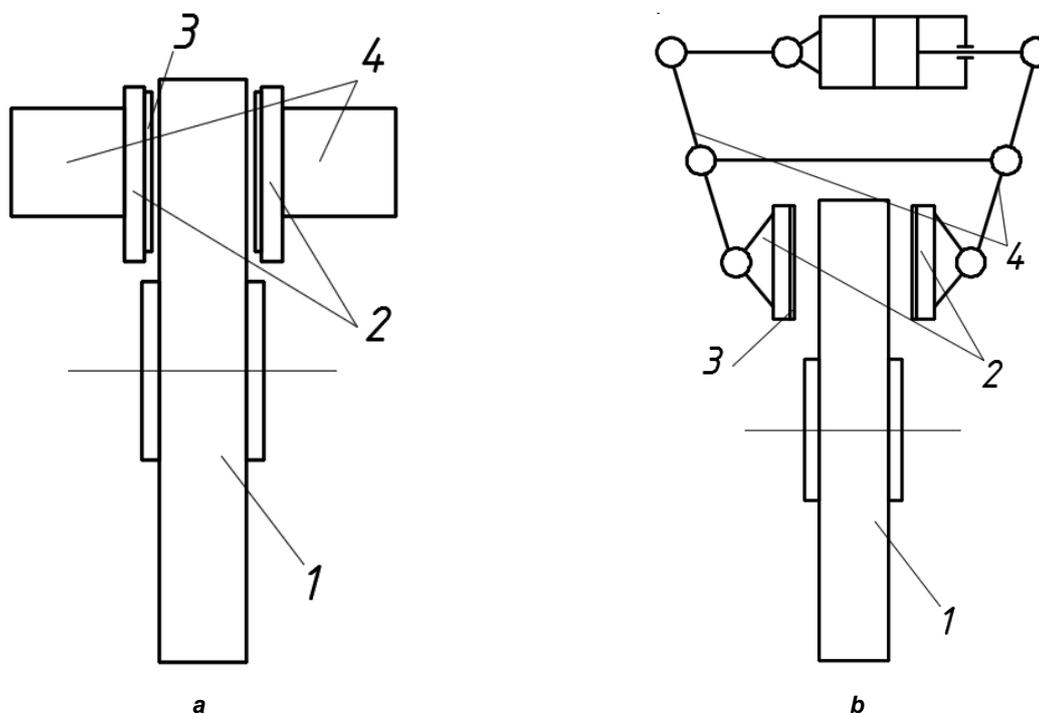


Рис. 1. Дисковые тормозные механизмы колодочного типа непосредственного воздействия (а) и с передаточным механизмом (б): 1 – тормозной диск, 2 – тормозная колодка, 3 – фрикционная накладка, 4 – прижимающий механизм
 Fig. 1. Pad-type disc brake mechanisms of direct action (a) and with a transmission gear (b): 1 – brake disc, 2 – brake pad, 3 – friction facing, 4 – clamping mechanism

кренности контакта рабочих поверхностей тормоза постоянным изменением площади контакта из-за деформирования микровыступов на взаимодействующих рабочих поверхностях. Динамическое взаимодействие в месте контакта фрикционной накладкой и рабочей поверхности тормозного диска напоминает колебательный процесс, созданный перемещением тормозной колодки и свободным краем рабочих поверхностей тормозного диска.

В работе [1] определялось влияние коэффициентов демпфирования (b) на критерии стабильности тормозных механизмов. С помощью построенной конечно-элементной модели определялись соотношения коэффициентов демпфирования i -х элементов в паре трения на критерии стабильности трибоконтакта. В результате исследований изучены различные типы распространения затухания по модам. Были замечены два основных эффекта: эффект переключения и эффект сглаживания. Первое всегда стабилизирует тормоз, в то время как ко второму это не относится. Сочетание этих двух эффектов может сделать тормоз более неустойчивым в зависимости от распространения дополнительного демпфирования. В работе [2] рассматривались две многомерные модели, в которых величина коэффициента демпфирования, как и местоположение демпфирующих элементов, определены в качестве ключевых факторов стабильности. Кроме того, воспроизводился дестабилизирующий эффект демпфирования задней пластины тормоза, который сравним с действием прокладок. В статье [3] приводились экспериментальные данные о влиянии микронеровностей поверхности диска поезда на распределение температурного поля по площади и изменению коэффициента трения. Полученные результаты CFD-модели были изложены в виде рекомендаций по предельной эксплуатации дисков поездов, при этом аналитической связи между исследуемыми параметрами не приведено. В статьях [4–6] дано решение обратной задачи, связанной с определением конструктивных параметров из известных значений тормозного момента и распределения контактного давления по площади рабочих поверхностей на основе структурно-параметрического синтеза. Несмотря на комплексный подход проектирования тормоза, данный расчет показал, что однозначного значения тормозного момента не существует и исходя из заданного значения можно полу-

чить ряд конструктивных значений диска с различными конфигурациями прижимающего механизма. Исследование [7] посвящено разработке модели дискового тормоза с распределенными параметрами для моделирования высокочастотного визга. Сравнение измеренных и рассчитанных частот вынужденных колебаний показало, что модальная связь, вызванная деформацией накладкой, может действовать как генератор визга. В работе [8] основное внимание уделялось характеристике формирования слоя трения и корреляции свойств слоя с характеристиками полимерматричных композитов. Механохимическое взаимодействие, происходящее в процессе трения, сравнивалось с ситуацией «без трения», когда «эквивалентные» температура и контактное давление, соответственно, были приложены к одному и тому же материалу. В статье [9] приведен сравнительный анализ тормозных дисков, выполненный из серого чугуна и углеродокерамики. Преимуществом углеродно-керамических соединений являются снижение веса и достижение высоких значений коэффициентов трения даже при высоких температурах. Недостатками данного материала являются стоимость применения и относительно высокая температура начала эффективного торможения по сравнению с обычными металлическими дисками. В статьях [10–13] приводится зависимость развиваемого тормозного усилия на курсовую устойчивость при различных режимах движения автомобилей. В исследовании [14] предлагается трехслойная конструкция тормозной колодки, на основе которой создана динамическая модель «тормозной диск – тормозная колодка с шестью степенями свободы» и проанализированы факторы, влияющие на нестабильность системы. В статье [15] изучена тенденция изменения износа во время торможения, а также проанализировано влияние тормозной нагрузки и начальной скорости торможения на износ. В исследовании [16] создан полный факторный расчет с использованием упрощенной версии ранее разработанного клеточно-автоматического подхода для исследования влияния четырех факторов на коэффициент трения и износ. В статье [17] представлена стратегия управления распределенными электродвигателями – по одному на колесо – для максимального рекуперативного торможения. Контроллер управляет совместным торможением между

несколькими электродвигателями и гидравлическими тормозами, которые по-прежнему необходимы для обеспечения максимальной эффективности торможения автомобиля. В работе [18] на основе модели гибридной неопределенности предлагается оптимизация конструкции дискового тормоза с гибридными неопределенностями на основе надежности для изучения оптимальной конструкции для снижения скрежета. В исследовании [19] приводится влияние распределения удельного давления на увеличение тормозного момента на основе конструкции тормозного диска с коническими рабочими поверхностями. В работе [20] исследуется деформация сжатия тормозных колодок при регулировке модуля упругости материала и изменения формы тормозной накладки.

Согласно проведенному анализу литературных источников, можно сделать вывод, что основное внимание уделяется влиянию конструктивных или технологических параметров рабочих поверхностей на эксплуатационные характеристики тормозных механизмов. Стабильность торможения оценивается в основном изменением коэффициента трения во времени взаимодействия, не учитывающим колебательный характер взаимодействия тормозных колодок и рабочих поверхностей тормозного диска. Используя проведенный анализ научных исследований, можно сформулировать два основных направления

стабилизации процесса торможения:

Первое связано с изменением материалов трения во фрикционном узле, что подразумевает увеличение износа взаимодействующих поверхностей.

Второе заключается в совершенстве конструкции тормозного механизма с дискретным трибоконтактом по времени и площади. Изменение трибоконтакта по времени и площади позволяет использовать существующие материалы фрикционных накладок при переменных количествах сегментных тормозных колодок.

Для сегментирования тормозных колодок необходимо оснастить их индивидуальным силовым приводом. Согласно схеме (рис. 2), индивидуальный силовой привод 1 воздействует на сегментную колодку 2. На тормозные колодки наклеены фрикционные накладки 3. Поочередно каждая из сегментных колодок прижимается к рабочей поверхности тормозного диска 4.

Для автоматического регулирования работы тормозного привода была разработана система управления тормозными прижимающими элементами (рис. 3), которая включала в себя непосредственно сами прижимающие элементы 1, соленоиды 2, обеспечивающие включение и отключение подачи тормозной

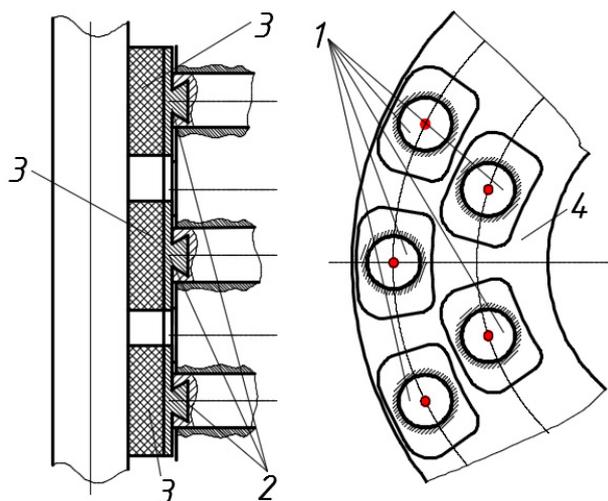


Рис. 2. Дисковый тормозной механизм колодочного типа с сегментными колодками: 1 – прижимающий элемент; 2 – тормозная колодка; 3 – фрикционная накладка; 4 – тормозной диск
Fig. 2. Pad-type disc brake with segmented pads: 1 – clamping element; 2 – brake pad; 3 – friction facing; 4 – brake disc

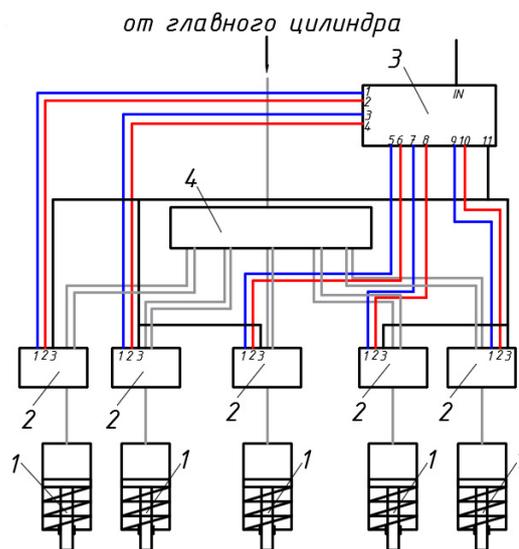


Рис. 3. Система управления прижимающими механизмами тормозных механизмов с гидравлическим приводом тормозной системы: 1 – прижимающий элемент; 2 – соленоид; 3 – плата управления прижимающим механизмом; 4 – гидроблок ABS
Fig. 3. Control system of brake device clamping mechanisms with the braking system hydraulic drive: 1 – clamping element; 2 – solenoid coil; 3 – clamping mechanism control board; 4 – ABS hydraulic unit

жидкости к прижимающим элементам, плату управления соленоидами 3, работающую на основе сигналов из блока антиблокировочной системы (АБС) 4. Система управления подачей тормозной жидкости может работать автономно относительно блока АБС, что позволяет с учетом нагрузки, приходящейся на колесо, и угловой скорости тормозящего колеса прижимать/отводить тормозные колодки от поверхности тормозного диска. Для испытания данного способа повышения стабильности и эффективности торможения вместо работы автоматической системы управления прижимающими элементами выполнялось ручное управление прижимающими элементами с сегментными колодками в условиях стендовых испытаний.

Для проведения стендового эксперимента был разработан стенд для исследования эксплуатационных параметров дисковых тормозных механизмов колодочного типа (рис. 4).

Электропривод осуществляет вращения тормозного диска через коробку передач, вывешенную на опорах качения с возможностью поворота вокруг оси вращения валов. Для осуществления торможения к рабочим поверхностям тормозного диска прижимались две колодки серийным тормозным суппортом, работающим от пневмопривода грузового автомобиля, либо разработанным суппортом с сегментными тормозными колодками с индивидуальными прижимающими элементами на основе гидропривода. Гидропривод индивидуальных тормозных колодок был выбран с точки зрения плавности работы в процессе взаимодействия рабочих поверхностей фрикционного узла. Замеры тормозного момента

производились с помощью S-образного тензометрического датчика, расположенного между стационарной опорой и рычагом, сочлененным с коробкой передач (рис. 5). При торможении в коробке возникал реактивный момент, стремящийся повернуть корпус коробки против вращения ее валов. Рычаг, закрепленный на корпусе коробки передач, создавал усилие на тензометрическом датчике. В результате электрический сигнал передавался на весовой терминал с дальнейшим построением кривой растягивающей силы во временном интервале при помощи программы PIC18F2550 USB HID Oscilloscope DR1r1.

Для расчета тормозного момента M_T при стендовых испытаниях использовалась зависимость:

$$M_T = P_c U_i r_{np}, \quad (1)$$

где P_c – растягивающая сила, определяемая с помощью тензодатчика, Н; U_i – передаточное число i -й передачи коробки передач; r_{np} – приведенный радиус от оси вращения вала коробки передач до точки крепления рычага к тензодатчику, м.

Для определения поперечного перемещения каждой сегментной тормозной колодки при взаимодействии с рабочей поверхностью диска использовался инклинометр-гироскоп WitMotion HWT905-TTL (см. рис. 6). При этом проводились замеры развиваемого тормозного момента для каждой сегментной тормозной колодкой в каждом ряду. Последовательность, количество циклов и время начала работы каждой сегментной колодки указано в таблице.

С помощью инклинометра-гироскопа WitMotion HWT905-TTL было смоделировано попереч-

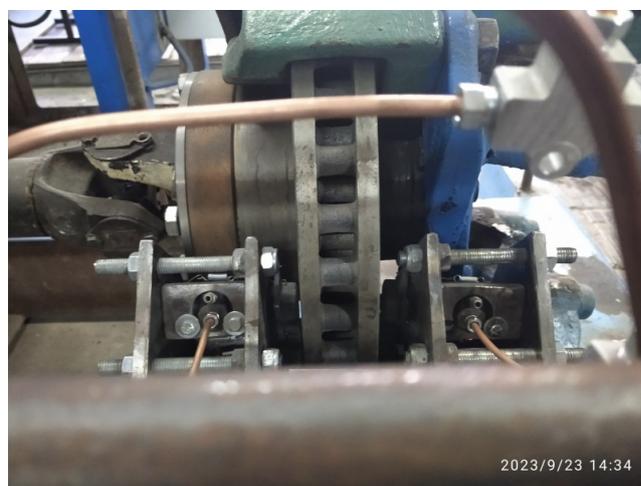


Рис. 4. Общий вид стенда для исследования эксплуатационных параметров дисковых тормозных механизмов колодочного типа

Fig. 4. General view of the test bench to study the operational parameters of pad-type disc brakes



Рис. 5. Способ установки тензодатчика для измерения тормозного момента
Fig. 5. Strain gauge installation method to assure the braking torque



Рис. 6. Инклинометр-гироскоп WitMotion HWT905-TTL
Fig. 6. Whitmotion HWT905-TTL gyroscope inclinometer

ное перемещение сегментных тормозных колодок для дисковых тормозных механизмов колодочного типа с тремя (рис. 7 а), пятью (рис. 7 б) и шестью (рис. 7 с) сегментными колодками.

Согласно последовательности, количеству циклов и времени начала работы каждой сегментной колодки и полученных величин тормозного момента в ряду сегментных колодок, были смоделированы тормозные моменты при взаимодействии сегментных колодок с рабочими поверхностями тормозного диска дисковых тормозных механизмов колодочного типа с тремя (рис. 8 а), пятью (рис. 8 б) и шестью (рис. 8 с) сегментными колодками.

В связи с наложением работы некоторых сегментных тормозных колодок друг на друга величины результирующих тормозных моментов для тормозных механизмов с тремя, пятью и шестью сегментными колодками будут иметь следующий вид (рис. 9). На диаграмме результирующих тормозных моментов для каждого тормоза с i -м количеством сегментных колодок (M_{T_i}) во времени (τ) рассчитывался коэффициент стабильности (K_{cmi}):

$$K_{cmi} = \frac{M_{T_{cpi}}}{M_{T_{maxi}}}, \quad (2)$$

где $M_{T_{cpi}}$, $M_{T_{maxi}}$ – величины среднего и максимального тормозных моментов для тормоза с i -м количеством сегментных колодок, Нм.

Как видно из графиков результирующего тормозного момента, для тормозного механизма с тремя прижимающими элементами кривая тормозного момента имела апериодические колебания по всему диапазону торможения. Это обеспечивалось смещением работы циклов каждого прижимающего элемента относительно других. На всей диаграмме встречались четыре просадки тормозного момента ввиду совпадения поперечных перемещений трех сегментных колодок. Для оценки стабильности и эффективности силовых факторов расчет проводился от времени устоявшегося тормозного момента (0,5 с). Коэффициенты стабильности и колебания тормозного момента составили 0,965 и 0,77.

При моделировании результирующего тормозного момента тормозного механизма с пятью прижимающими элементами кривая тормозного момента на протяжении всего установившегося времени торможения имела незначительные колебания значений, что определялось достаточным количеством перекрытия перемещений сегментных колодок устройства в целом. K_{cm} и K_{kmm} составили

Количество циклов, начало работы, продолжительность работы прижимающих элементов тормозных механизмов
Number of cycles, operation start, duration of brake mechanism clamping element operation

Дисковые тормозные механизмы колодочного типа с сегментными колодками				
Номер прижимающего элемента	Продолжительность работы, с	Количество циклов	Время начала работы, с	
Первый	2,4	9	0	
Второй	2,0	11	0	
Третий	2,0	10	+0,5	
Четвертый	2,4	6	+0,5	
Пятый	2,0	10	+1,1	
Шестой	2,4	8	+1,1	

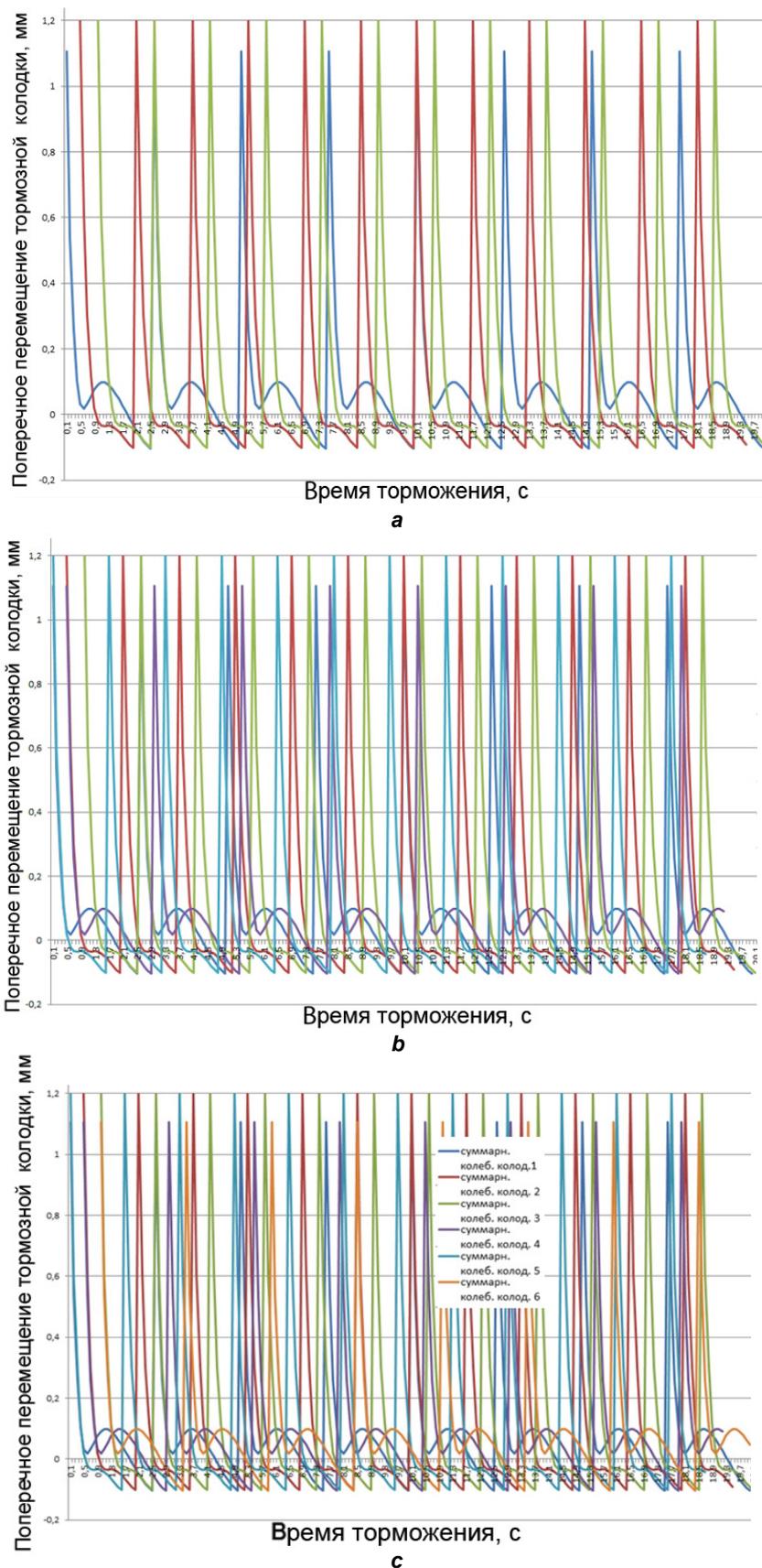


Рис. 7. Изменение поперечных перемещений колодок тормозных механизмов во времени при циклическом взаимодействии: а – с тремя; б – с пятью; с – с шестью сегментными колодками
Fig. 7. Variation in transverse movements of brake pads over time under cyclic interaction: a – with three segmented pads; b – with five segmented pads; c – with six segmented pads

0,984 и 0,89 соответственно. Дополнение к тормозному механизму с пятью прижимающими элементами еще одного прижимающего элемента позволило увеличить коэффициенты стабильности и колебания тормозного момента до значений 0,991 и 0,961.

Для апробации моделируемых диаграмм результирующих тормозных моментов были проведены стендовые испытания дисковых тормозных механизмов колодочного типа с различным количеством сегментных тормозных колодок. В качестве контролируемых параметров использовались время взаимодействия каждой сегментной колодки, начало взаимодействия, количество циклов (см. таблицу) и развиваемый тормозной момент механизмом. За аналогичное время циклического торможения (20 с), как при моделировании, была построена диаграмма тормозных моментов для моноприжимающего и полиприжимающих механизмов тормозных механизмов с сегмент-

ными тормозными колодками (рис. 10).

Согласно апробации разработанного способа обеспечения стабильности торможения, проведенные стендовые испытания тормозных механизмов различных типов с разным количеством сегментных тормозных колодок показали рост показателей стабильности у тормозных механизмов различных типов с шестью прижимающими элементами относительно дисковых тормозных механизмов колодочного типа с моноприжимающим механизмом и единичными колодками:

- коэффициенты стабильности и колебания тормозного момента увеличились на 12,2 и 34,9% соответственно;

- разница между моделируемыми и экспериментальными данными коэффициентов стабильности и колебания тормозного момента в среднем для трех вариантов тормозных механизмов составила в среднем 5,1 и 6,7%.

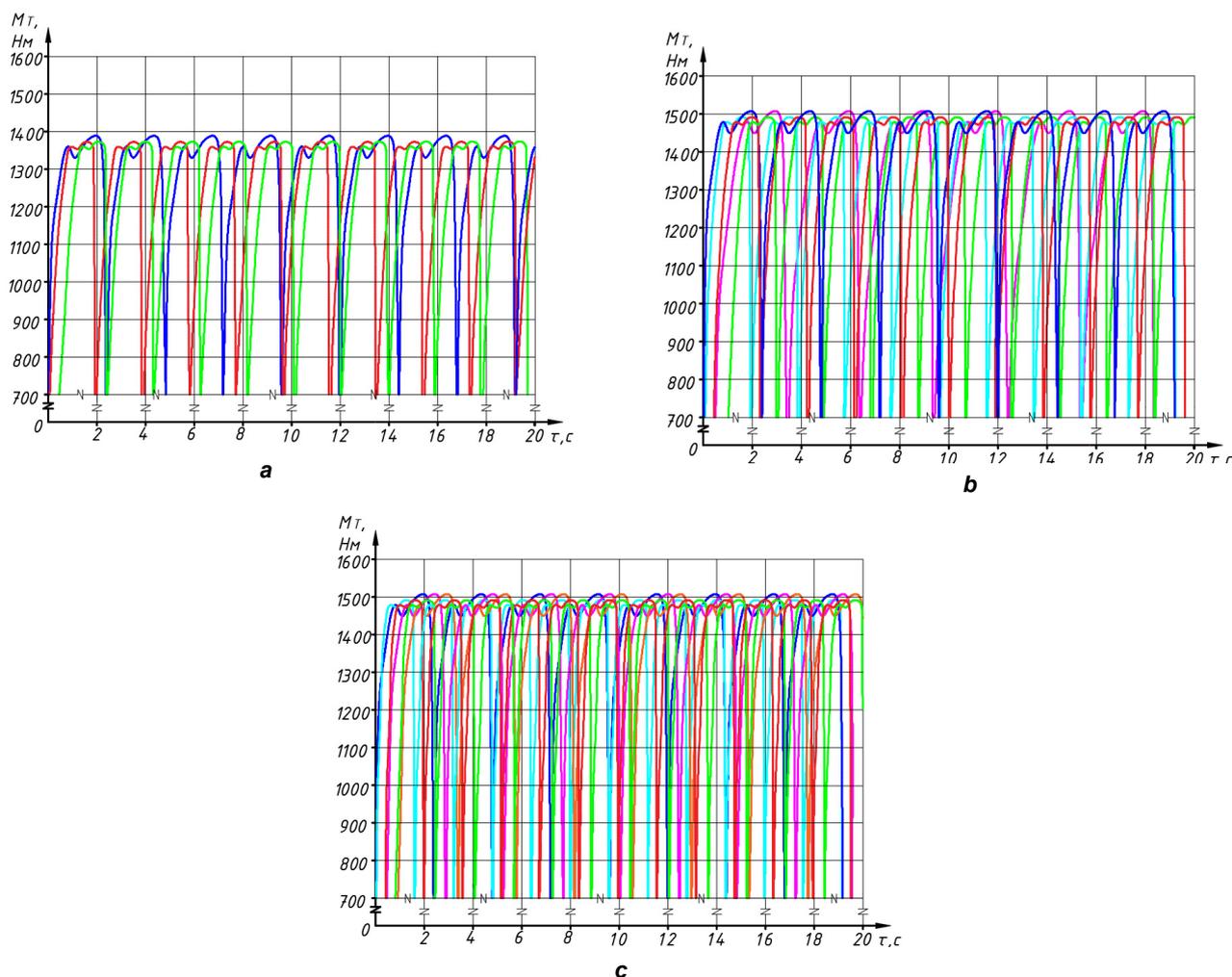


Рис. 8. Моделируемые диаграммы тормозного момента дисковых тормозных механизмов колодочного типа (M_t) во времени при циклическом взаимодействии: а – с тремя; б – с пятью; с – с шестью прижимающими элементами
 Fig. 8. Simulated diagrams of the braking torque of pad-type disc brake devices (M_t) over time under cyclic interaction: a – with three clamping elements; b – with five clamping elements; c – with six clamping elements

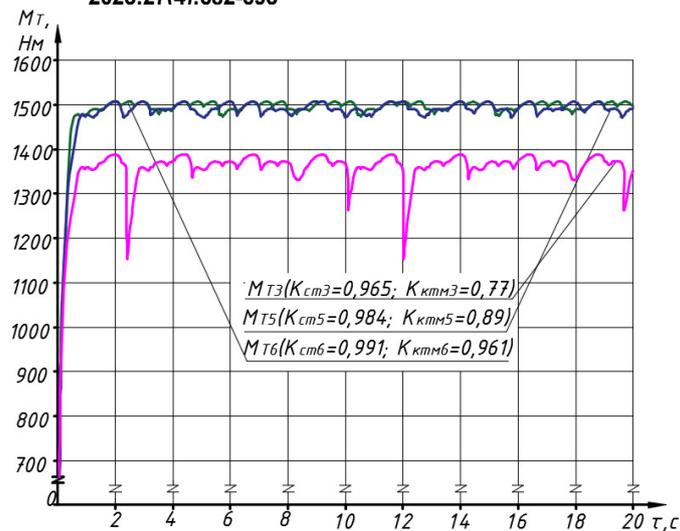


Рис. 9. Моделируемые диаграммы результирующего тормозного момента дисковых тормозных механизмов колодочного типа во времени при циклическом взаимодействии: с тремя, пятью и шестью прижимающими элементами

Fig. 9. Simulated diagrams of the resulting braking torque of pad-type disc brake devices over time under cyclic interaction with three, five and six clamping elements

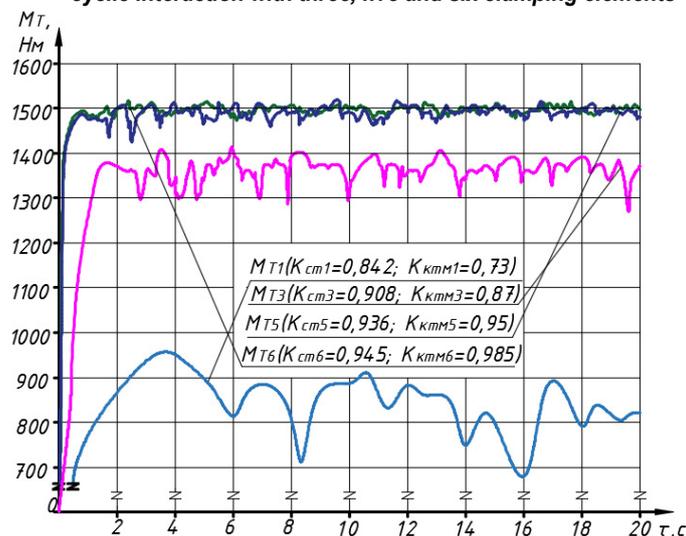


Рис. 10. Диаграммы тормозного момента механизмов с сегментными колодками в зависимости от количества прижимающих элементов и серийных дисковых тормозных механизмов колодочного типа

Fig. 10. Braking torque of segmented pad devices vs the number of clamping elements and serial pad-type disc brake mechanisms

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении необходимо отметить, что дифференцирование прижимающих элементов и тормозных колодок способствует росту параметров стабильности и эффективности торможения для различных типов дисковых тормозных механизмов колодочного типа. Проведенное моделирование изменения поперечного перемещения тормозных колодок и развиваемого тормозного момента способствует построению проектируемых тормозных механизмов с гарантированными величинами выходных характеристик и параметров их стабильности в период взаимодействия рабочих

поверхностей. Апробация при проведении стендовых испытаний дала показатели расхождения между моделируемыми и экспериментальными данными коэффициентов стабильности и колебания тормозного момента для трех объектов исследования 5,1 и 6,7% соответственно. Увеличение значений коэффициентов стабильности и колебания тормозного момента для тормозного механизма с шестью сегментными тормозными колодками относительно моноприжимающего тормозного механизма с единой колодкой объяснимо снижением влияния геометрии взаимодействующих поверхностей.

Список источников

1. Fritz G., Sinou J.-J., Duffal J.-M., Jezequel L. Effects of damping on brake squeal coalescence patterns—application on a finite element model // *Mechanics Research Communications*. 2007. Vol. 34. No. 2. P. 181–190. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2006.09.012>.
2. Wehner J.-H., Jekel D., Sampaio R., Hagedorn P. Optimization of finite element models of disc brakes // *Part of the SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology book series*. Cham: Springer, 2018. P. 31–48. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62713-7_4.
3. Bulthé A.L., Desplanques Y., Degallaix G., Coupling between friction physical mechanisms and transient thermal phenomena involved in pad-disc contact during railway braking // *Wear*. 2007. Vol. 263. Iss. 7-12. P. 1230–1242. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.052>.
4. Поляков П.А. Метод проектирования тормозного механизма дисково-колодочного типа с использованием структурно-параметрического синтеза тормозного механизма // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2021. № 12. С. 547–555. <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2021-22-12-547-555>. EDN: VYPNKD.
5. Поляков П.А. Функционально-структурная модель структурно-параметрического синтеза тормозного механизма // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщений*. 2021. № 4. С. 32–43. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_4_32. EDN: ZZLSBQ.
6. Яицков И.А., Литвинов А.Е., Поляков П.А., Задаянчук Н.А. Структурно-параметрический синтез дисково-колодочного тормоза // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщений*. 2021. № 2. С. 75–85. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_2_75. EDN: NYXZGN.
7. Flint J., Hultén J. Lining-deformation-induced modal coupling as squeal generator in a distributed parameter disc brake model // *Journal of Sound and Vibration*. 2002. Vol. 254. Iss. 1. P. 1–21. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.4052>.
8. Filip P., Weiss Z., Rafaja D. On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications // *Wear*. 2002. Vol. 252. Iss. 3-4. P. 189–198. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00873-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00873-0).
9. Konca B. Material selection of brake rotors for sports cars // *MECH 202 TERM PROJECT*. 2019. 16 p. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.13813865>.
10. Li Peilong, Xu Hongmei. Braking efficiency and stability of chassis braking system of combine harvester: the theoretical derivation and virtual prototype simulation // *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6713231>.
11. Chen Qingzhang, Liu Youhua, Li Xuezhi. Stability control of vehicle emergency braking with tire blowout // *International Journal of Vehicular Technology*. 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/436175>.
12. Wang Fahui, Lu Yongjie, Li Haoyu. Heavy-duty vehicle braking stability control and HIL verification for improving traffic safety // *Journal of Advanced Transportation*. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5680599>.
13. Yin Guodong, Jin XianJian. Cooperative control of regenerative braking and antilock braking for a hybrid electric vehicle // *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/890427>.
14. Pan Gongyu, Chen Lei. Impact analysis of brake pad backplate structure and friction lining material on disc-brake noise // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7093978>.
15. Zhang S., Hao Q., Liu Y., Jin L., Ma F., Sha Z., et al. Simulation study on friction and wear law of brake pad in high-power disc brake // *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6250694>.
16. Wahlström J. A Factorial design to numerically study the effects of brake pad properties on friction and wear emissions // *Advances in Tribology*. 2016. 10 p. <https://doi.org/10.1155/2016/8181260>.
17. Vignati M., Belloni M., Tarsitano D., Sabbioni E. Optimal cooperative brake distribution strategy for IWM vehicle accounting for electric and friction braking torques // *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/1088805>.
18. Lü Hui, Yu Dejie. Stability optimization of a disc brake system with hybrid uncertainties for squeal reduction // *Shock and Vibration*. 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3497468>.
19. Поляков П.А., Федотов Е.С., Полякова Е.А., Голиков А.А., Виниченко В.О. Математическое моделирование удельного давления тормозного механизма // *Мехатроника, автоматика и робототехника*. 2020. № 5. С. 20–25. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2020-5-20-25>.
20. Gu Yihong, Liu Yucheng, Lu Congda. Effect of compressive strain of brake pads on brake noise // *Shock and Vibration*. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8832363>.

References

1. Fritz G., Sinou J.-J., Duffal J.-M., Jezequel L. Effects of damping on brake squeal coalescence patterns—application on a finite element model. *Mechanics Research Communications*. 2007;34(2):181-190. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2006.09.012>.
2. Wehner J.-H., Jekel D., Sampaio R., Hagedorn P. Optimization of finite element models of disc brakes. In: *Part of the SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology book series*. Cham: Springer; 2018, p. 31-48. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62713-7_4.

org/10.1007/978-3-319-62713-7_4.

3. Bulthé A.L., Desplanques Y., Degallaix G., Coupling between friction physical mechanisms and transient thermal phenomena involved in pad-disc contact during railway braking. *Wear*. 2007;263(7-12):1230-1242. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.052>.
4. Polyakov P.A. The method of designing a disc-pad brake mechanism of the structural-parametric synthesis of the brake mechanism. *Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii = Assembly in mechanical engineering, instrumentation*. 2021;12:547-555. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2021-22-12-547-555>. EDN: VYPNKD.
5. Polyakov P.A. Functional-structural model of the structural-parametric synthesis of the braking mechanism. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshchenij = Published by Vestnik RGUPS, Rostov State Transport University*. 2021;4:32-43. (In Russ.). https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_4_32. EDN: ZZLSBQ.
6. Yaickov I.A., Litvinov A.E., Polyakov P.A., Zadayanchuk N.A. Structural and parametric synthesis of disc-pad and brake. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshchenij = Published by Vestnik RGUPS, Rostov State Transport University*. 2021;2:75-85. (In Russ.). https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_2_75. EDN: NYXZGN.
7. Flint J., Hultén J. Lining-deformation-induced modal coupling as squeal generator in a distributed parameter disc brake model. *Journal of Sound and Vibration*. 2002;254(1):1–21. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.4052>.
8. Filip P., Weiss Z., Rafaja D. On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications. *Wear*. 2002;252(3-4):189-198. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00873-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00873-0).
9. Konca B. Material selection of brake rotors for sports cars. In: *MECH 202 TERM PROJECT*. 2019, 16 p. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.13813865>.
10. Li Peilong, Xu Hongmei. Braking efficiency and stability of chassis braking system of combine harvester: the theoretical derivation and virtual prototype simulation. In: *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6713231>.
11. Chen Qingzhang, Liu Youhua, Li Xuezhi. Stability control of vehicle emergency braking with tire blowout. In: *International Journal of Vehicular Technology*. 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/436175>.
12. Wang Fahui, Lu Yongjie, Li Haoyu. Heavy-duty vehicle braking stability control and HIL verification for improving traffic safety. In: *Journal of Advanced Transportation*. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5680599>.
13. Yin Guodong, Jin XianJian. Cooperative control of regenerative braking and antilock braking for a hybrid electric vehicle. In: *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/890427>.
14. Pan Gongyu, Chen Lei. Impact analysis of brake pad backplate structure and friction lining material on disc-brake noise. In: *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7093978>.
15. Zhang S., Hao Q., Liu Y., Jin L., Ma F., Sha Z., et al. Simulation study on friction and wear law of brake pad in high-power disc brake. In: *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6250694>.
16. Wahlström J. A factorial design to numerically study the effects of brake pad properties on friction and wear emissions. In: *Advances in Tribology*. 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/8181260>.
17. Vignati M., Belloni M., Tarsitano D., Sabbioni E. Optimal cooperative brake distribution strategy for iWM vehicle accounting for electric and friction braking torques. In: *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/1088805>.
18. Lü Hui, Yu Dejie. Stability optimization of a disc brake system with hybrid uncertainties for squeal reduction. In: *Shock and Vibration*. 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3497468>.
19. Polyakov P.A., Fedotov E.S., Polyakova E.A., Golikov A.A., Vinichenko V.O. Mathematical modeling of brake specific pressure. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2020;5:20-25. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2020-5-20-25>.
20. Gu Yihong, Liu Yucheng, Lu Congda. Effect of compressive strain of brake pads on brake noise. In: *Shock and Vibration*. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8832363>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Поляков Павел Александрович,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры «Транспортные процессы
и технологические комплексы»,
Кубанский государственный технологический
университет,
350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2, Россия
✉ polyakov.pavel88@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0576-5398>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pavel A. Polyakov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Transport processes
and technological complexes,
Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya St., Krasnodar 350072, Russia
✉ polyakov.pavel88@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0576-5398>

Вклад автора

Автор выполнил аналитическую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.10.2023 г.; одобрена после рецензирования 27.10.2023 г.; принята к публикации 06.11.2023 г.

Contribution of the author

The author performed a comprehensive analysis, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Conflict of interests

The author declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by author.

Information about the article

The article was submitted 20.10.2023 ; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 06.11.2023.



Обзорная статья
УДК 621.3.07
EDN: FJPNDG
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-694-726

Возможность использования мультиагентного управления режимами виртуальной инерции ветроэлектрической станции

В.Ю. Астапов¹✉

¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель – провести обзор литературных источников, посвященных увеличению эффективности и качеству управления ветроэлектрическими станциями. Анализируются работы по снижению негативного влияния ветроустановок на энергосистему и их участию в оказании системных услуг, например первичном регулировании частоты. Изучено около 150 научных статей и обзоров, подобранных в различных научных источниках (в том числе IEEE, Web of Science и Scopus) по ключевым словам «ветроэлектрическая станция», «ветроустановка», «мультиагентное управление», «виртуальная инерция», «микросеть», «виртуальная электростанция», «регулирование частоты». Применен метод систематизированного обзора специализированных источников, который дает возможность обеспечить четко определенную структуру для данной области исследований путем категоризации статей. Показано, что развитие технологий, позволяющих повысить регулировочные способности ветроэлектрической станции, является актуальной задачей, так как низкая инерция источников возобновляемой энергии приводит к снижению устойчивости энергосистем, в составе которых значительную долю составляют ветроэлектрические станции. Из анализа литературных источников следует, что одним из решений повышения устойчивости таких энергосистем является создание виртуальной инерции ветроэнергетических установок. Однако, ввиду ограниченной мощности и возможностей регулирования каждого отдельного ветрогенератора, эффективность внедрения виртуальной инерции может быть недостаточной при ее независимой реализации на отдельных установках. Более того, показано, что несогласованное управление может повлиять на устойчивость системы. В данном обзоре выполнен анализ специализированных источников по вопросу скоординированного мультиагентного управления виртуальной инерцией нескольких ветроустановок (ветропарка). Сделан вывод о том, что на сегодняшний день исследования предлагаемого подхода не проводились либо не представлены, а описанные в обзоре тезисы можно подтвердить, разработав необходимые алгоритмы и проведя анализ результатов.

Ключевые слова: ветроэлектрическая станция, ветроустановка, мультиагентное управление, виртуальная инерция, микросеть, виртуальная электростанция, регулирование частоты

Благодарности: Исследование проводилось в рамках государственного задания Российской Федерации по проекту FWEU-2021–0001.

Для цитирования: Астапов В.Ю. Возможность использования мультиагентного управления режимами виртуальной инерции ветроэлектрической станции. // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 694–726. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-694-726>. EDN: FJPNDG.

POWER ENGINEERING

Review article

Applicability of multi-agent control for virtual inertia modes in a wind power plant

Vyacheslav Yu. Astapov¹✉

¹Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. This work presents a literature review devoted to increasing the efficiency and quality of managing wind power plants. The analysis focuses on mitigating the adverse effects of wind turbines on the power system and providing system services, such as primary frequency regulation. Nearly 150 scientific publications and reviews, selected from various scientific sources (such as IEEE, Web of Science and Scopus) by the keywords, including “wind power station”, “wind turbine”, “multi-agent control”, “virtual inertia”, “microgrid”, “virtual power plant”, and “frequency control”, were evaluated.

A systematic review methodology of specialised sources was applied, which offers a defined structure for this field of research by categorising articles. The study emphasises the urgency of developing technologies to increase the regulation capacity of a wind power plant, since the low inertia of renewable energy sources leads to a decrease in the stability of power systems, a significant proportion of which accounts for wind power plants. It follows from the literature review that one of the means to increase the stability of such power systems is the creation of virtual inertia for wind power plants. However, due to the limited capacity and control capabilities of each individual wind turbine, the efficiency of introduced virtual inertia may be insufficient, when implemented for individual units. Moreover, it is shown that uncoordinated control can affect the stability of the system. In this review, the specific sources considering coordinated multi-agent control of the virtual inertia for several wind turbines (wind power plants) were analysed. The review concludes that the proposed approach is currently understudied, while the outlined theses can be confirmed by developing the necessary algorithms and analysing the results.

Keywords: wind power plant, wind turbine, multi-agent control, virtual inertia, microgrid, virtual power plant, frequency control

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the state assignment of the Russian Federation No. FWEU-2021-0001.

For citation: Astapov V.Yu. Applicability of multi-agent control for virtual inertia modes in a wind power plant. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):694-726. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-694-726>. EDN: FJPNDG.

Список сокращений

ВЭУ	–	Ветроэнергетическая установка	СГПМ	–	Синхронный генератор с постоянными магнитами
ВЭС	–	Ветровая электростанция	УПП	–	Устройство плавного пуска
СЭС	–	Солнечная электростанция	БК	–	Батарея конденсаторов
МГЭС	–	Малая гидроэлектростанция	ПЧ	–	Преобразователь частоты
ВИЭ	–	Возобновляемые источники энергии	ВИ	–	Виртуальная инерция
АГКЗ	–	Асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором	УВИ	–	Управление виртуальной инерцией
АГФР	–	Асинхронный генератор с фазным ротором	МАУ	–	Мультиагентное управление
АГДП	–	Асинхронный генератор двойного питания	АКБ	–	Аккумуляторная батарея
МДП	–	Машина двойного питания	СК	–	Суперконденсатор

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире наблюдается растущее внедрение возобновляемых источников энергии, в том числе ветроустановок в качестве основных источников электроэнергии в энергосистемах. Глобальный совет по ветроэнергетике (GWEC) 19 мая 2022 г. опубликовал отчет об установках ветряных турбин в мире по итогам 2021 г. Тридцать производителей ветроэнергетических установок (ВЭУ) ввели в эксплуатацию 29 234 турбины общей мощностью 104,7 ГВт. В будущем в связи с кризисом традиционных энергоресурсов эта цифра будет еще значительнее.

При этом и в России наблюдается рост установленной мощности ВЭУ. Согласно данным отчета компании «Системный оператор Единой энергетической системы», установленная мощность аттестованных и функционирующих на оптовом энергетическом рынке России ВЭС на начало 2022 г. составляет 1937,7 МВт. Выработка ВЭС в марте 2022 г. была 532,3 млн кВт·ч, что на 53,8% больше, чем в марте 2021 г. С начала года выработка ВЭС увеличилась на 78,9%, по сравнению с первым кварталом 2021 г., и составила 1586,3 млн кВт·ч.

В России действуют меры господдержки строительства генерирующих объектов на основе ВИЭ. Минэнерго России ожидает, что до 2035 г. в Российской Федерации будет введено 6,7 ГВт мощностей на базе ВИЭ, куда помимо ветроэнергетики входит также и солнечная энергетика. Сейчас, по данным Ассоциации развития возобновляемой энергии, мощность ВИЭ равна 5,3 ГВт, или 2,1% мощности энергосистемы России.

При этом, согласно некоторым исследованиям [1], негативное влияние ВИЭ на устойчивость энергосистемы отчетливо наблюдается при ее доле в 10%, а в некоторых случаях и 5% от установленной мощности. Можно сделать вывод о том, что в ближайшее десятилетие в России придется столкнуться с негативным эффектом от развития возобновляемых источников энергии в некоторых составных единицах энергосистемы страны, где установка ВИЭ наиболее целесообразна.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проанализировано около 150 научных статей и обзоров, подобранных в различных научных источниках (в том числе IEEE, Web of Science и Scopus) по ключевым словам «ветро-

электрическая станция», «ветроустановка», «мультиагентное управление», «виртуальная инерция», «микросеть», «виртуальная электростанция», «регулирование частоты». Для данного исследования был применен метод систематизированного обзора специализированных литературных источников, который позволяет обеспечить четко определенную структуру для данной области исследований путем категоризации статей.

ВЛИЯНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ЭНЕРГОСИСТЕМУ

Говоря о негативном влиянии ВИЭ на энергосистему, имеются в виду два аспекта. Во-первых, это стохастический характер выработки электроэнергии [2, 3]. Если традиционные источники энергии могут гарантировать выдачу мощности в тот или иной момент времени, то нетрадиционные источники (солнечные и ветровые установки) не могут соблюсти это условие. Борьба с неопределенностью можно применением различных стратегий управления, о которых пойдет речь в данном обзоре, а также обеспечением резервов мощности, использованием комбинации ветровых и солнечных источников энергии, систем накопления электроэнергии.

Второй аспект связан со способом подключения источников ветровой и солнечной электроэнергии к сети. Ветроустановки (как и солнечные электростанции) подключены к сети с использованием силовых выпрямительно-инверторных преобразователей, разрывающих инерционную связь между вращающимся ротором ветрогенератора и энергосистемой, к которой он подключен. У солнечных электростанций вообще нет вращающихся частей.

Если классические генераторы традиционных источников энергии, такие как гидро- и турбогенераторы, при возникновении возмущений в электрической сети (быстро отключаемое короткое замыкание) способны сохранять устойчивость своей работы, благодаря тому что для изменения их выходных параметров необходимо значительно большее время на разгон и торможение роторов, то силовые преобразователи ветроустановок способны мгновенно реагировать на изменение параметров сети, что, свою очередь, может вызывать опасные для самого преобразователя режимы работы ветроэнергетической установки (ВЭУ) и может произойти вынужден-

ное отключение ветроустановки от сети. При большой доле ветрогенерации в составе энергосистемы это вызывает снижение ее надежности, выражающееся, в частности, в увеличении амплитуды колебания частоты в сети при нарушении баланса мощности. Например, даже небольшое отключение части генерации, которое в системе с традиционными источниками энергии за счет их инерции не привело бы к значительному снижению частоты, а впоследствии было бы оперативно скорректировано, в энергосистеме с высокой долей ВИЭ может привести к падению частоты, а при отсутствии необходимых алгоритмов управления – к ее устойчивому снижению. Коррекция частоты в этом случае может быть выполнена только через достаточно длительный промежуток времени с использованием вторичного регулирования.

Таким образом, вследствие возрастающих требований потребителей к надежности их электроснабжения и качеству поставляемой электроэнергии, а также массового применения силовой электроники для подключения вышеуказанных типов генерирующих установок [4], необходимо осуществление цифровизации таких систем, создание информационно-коммуникативных и управляющих подсистем.

Инерционность силового выпрямительно-инверторного преобразователя можно повысить за счет создания так называемой «виртуальной инерции». Однако ввиду ограниченной мощности и возможностей регулирования каждого отдельного ветрогенератора эффективность внедрения виртуальной инерции может быть недостаточной при независимой ее реализации на отдельных установках. Более того, несогласованное управление может повлиять на устойчивость системы.

В данном обзоре выполнен анализ специализированных источников по вопросу скоординированного мультиагентного управления несколькими ветроустановками (ветропарком). В таблице представлено разделение материалов на категории.

Обзор поделен на 3 раздела. В 1 разделе описываются существующие стратегии управления ветроустановками, их моделирование и базовая теория, в том числе стратегия мультиагентного регулирования. Во 2 разделе рассматриваются две основные концепции интеграции ВИЭ – микросеть и виртуальная

Категоризация статей
Source categories

№	Категория	Литературные источники
1	Базовая теория, общие обзоры	[2–9]
2	Мультиагентное управление	[35, 37–46, 60–72]
3	Стратегии управления ВЭУ	[11, 13–14, 18, 20–25, 31–34, 129]
4	Моделирование ВЭУ	[12, 15–17, 19, 26–30]
5	Микросети	[47–59, 98]
6	Виртуальная инерция	[10, 96–97, 101–128]
7	Поддержание частоты в энергосистеме с помощью ВЭУ	[1, 84–95, 99–100]
8	Виртуальная электростанция	[36, 73–83]

электростанция. В 3 разделе обосновывается и описывается участие ветроустановок в поддержании частоты в сети, в том числе посредством обеспечения виртуальной инерции.

1. БАЗОВАЯ ТЕОРИЯ. ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ

Как известно, ветроустановка преобразует кинетическую энергию ветрового потока в механическую энергию вращения ротора с последующим ее преобразованием в электрическую энергию. Теоретическое описание работы ВЭУ, базовые методы расчета ветряков появились в нашей стране еще во времена СССР с трудами Г.Х. Сабина [5] и Е.М. Фатеева [6]. При этом и в настоящее время разрабатываются отечественные учебные, справочные и методические пособия, в частности пособие П.П. Безруких² [7], в книге которого имеются основные формулы расчета ветроэлектрических установок, большой справочный материал по зарубежным и отечественным ветроустановкам. В монографии В.В. Елистратова [2] рассмотрены принципиальные вопросы современного состояния развития энергетики возобновляемых источников, проанализированы причины бурного роста мощности установок на основе ВИЭ в мире. Показано, что движущими силами, заставляющими государства заниматься интенсивным развитием ВИЭ, является необходимость обеспечения ресурсной безопасности, энергетической и экологической, а также социально-экономической.

Детально проанализирован мировой опыт законодательской работы по поддержке раз-

вития ВИЭ и принимаемые в России акты. Даны технические схемы и установки по использованию отдельных видов возобновляемой энергии, методики определения их параметров. Учитывая стохастический характер выработки энергии ВИЭ, для создания надежной системы энергоснабжения дается классификация видов и принципы аккумулирования и комплексного использования энергии ВИЭ, в том числе с использованием принципов гидравлического аккумулирования энергии ВИЭ. В труде В.М. Ляхера [8] приведены общие положения о развитии ветроэнергетики, в том числе за счет размещения ветроагрегатов в акваториях морей. В статьях российских ученых [3] описывается развитие ситуации с использованием ВИЭ в России, приводится методология развития изолированных энергосистем с использованием ВИЭ, в статьях С.В. Грибкова, И.В. Юдаева, С.А. Ракитова [9] можно найти примеры моделирования ВЭУ с вертикальной осью.

Исходя из вышеизложенных трудов, можно выделить четыре типа ветроэлектрических установок.

1. ВЭУ с асинхронным генератором с короткозамкнутым ротором (АГКЗ).

В данной ветроустановке используется АГКР, который непосредственно подключен к сети через трансформатор (Т) (рис. 1).

Данная система активно использовалась в Европе в 1980-х и 1990-х годах.

Редуктор (Р) в данной схеме необходим для увеличения частоты вращения генератора, чтобы при номинальной скорости ветра иметь возможность развивать свою номинальную мощность. При запуске системы возникают высокие пусковые токи, поэтому необходимо,

²Безруких П.П., Безруких П.П. (мл.), Грибков С.В. Ветроэнергетика: справ.-метод. издание / под общ. ред. П.П. Безруких. М.: ИнтехэнергоИздат; Теплоэнергетик, 2014. 304 с.

чтобы они ограничивались. Для этого используется устройство плавного пуска (УПП), которое после запуска системы отключается переключателем. Реактивную мощность генератора обеспечивает батарея конденсаторов (БК).

Для того чтобы увеличить диапазон рабочей частоты вращения ветроустановки и, как следствие, генерируемую мощность, а также уменьшить потери на намагничивание при низкой скорости ветра, используется либо два генератора с разным числом пар полюсов, либо один генератор, но с двумя обмотками, имеющими разное число пар полюсов.

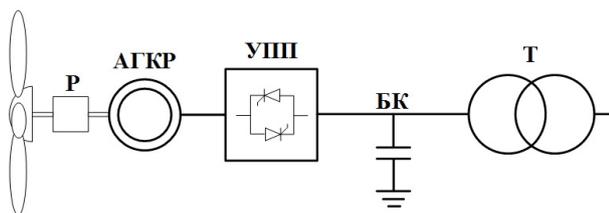


Рис. 1. Ветроэнергетическая установка с АГКР:
АГКР – асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором; Р – редуктор; УПП – устройство плавного пуска; Т – трансформатор; ВТ – ветротурбина, БК – батарея конденсаторов

Fig. 1. Wind power plant with an asynchronous generator with a squirrel-cage rotor: АГКР – asynchronous generator with a squirrel-cage rotor; Р – gearbox; УПП – soft starter; Т – transformer; ВТ – wind turbine, БК – capacitor bank

Преимущества:

- 1) высокая надежность;
- 2) низкая стоимость;
- 3) простота конструкции;
- 4) в конструкции отсутствуют кольца скольжения, которые периодически надо обслуживать.

Недостатки:

- 1) система подключается к сети только при заданной скорости ветра, потому что только при этом обеспечивается требуемое качество напряжения;
- 2) из-за отсутствия необходимых контуров управления колебания скорости ветра переносятся на механические колебания, что отражается в виде неравномерности электрической мощности;
- 3) при малых скоростях ветра возможна только автономная работа.

2. ВЭУ с асинхронным генератором с фазным ротором с регулированием сопротивления обмотки ротора.

В данной ветроустановке используется АГФР (асинхронный генератор с фазным ротором), который непосредственно подключен к сети через трансформатор (рис. 2). В схему фазных обмоток ротора последовательно

включены регулируемые сопротивления, изменение которых влияет на характеристики крутящего момента генератора. Это позволяет ветроустановке работать с разной скоростью вращения турбины. Однако резисторная группа имеет ограниченную мощность теплоотдачи, поэтому рабочий диапазон равняется порядка $0 \div 10\%$ относительно номинальной частоты.

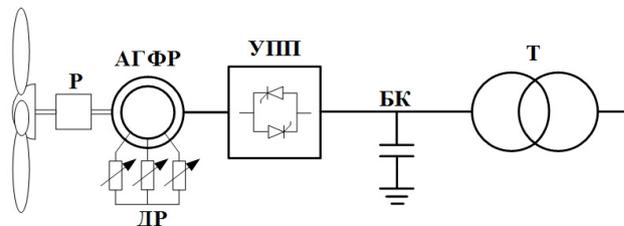


Рис. 2. Ветроэнергетическая установка с АГФР:
АГФР – асинхронный генератор с фазным ротором; Р – редуктор; ДР – дополнительные резисторы; УПП – устройство плавного пуска; БК – батарея конденсаторов; Т – трансформатор

Fig. 2. Wind power plant with an asynchronous generator with a wound rotor: АГФР – asynchronous generator with a wound rotor; Р – gearbox; ДР – additional resistors; УПП – soft starter; БК – capacitor bank; Т – transformer

Преимущества:

- 1) низкая стоимость;
- 2) простота;
- 3) благодаря переменной скорости АГФР может отбирать больше энергии ветра, чем АГКЗ.

Недостатки:

- 1) диапазон скоростей ограничен 10%;
- 2) потери на резисторах;
- 3) также требует плавного пуска и компенсации реактивной мощности.

Первые два типа ВЭУ (АГКЗ и АГФР) имеют следующие общие недостатки:

- их синхронная работа с сетью возможна только при номинальной скорости ветра;
- асинхронный генератор при работе может потреблять реактивную мощность из сети, из-за чего требуется предусматривать компенсацию.

3. ВЭУ с асинхронным генератором двойного питания

В данной ветроустановке используется АГФР, статор которого подключается непосредственно к сети через трансформатор, а ротор подключается к сети через ПЧ (преобразователь частоты) и трансформатор (Т) (рис. 3). Это компоновка в современной ветроэнергетике является наиболее применяемой.

Преобразователь необходим для управления мощностью в цепи ротора. Выходная мощность, генерируемая ВЭУ с асинхронным

генератором с короткозамкнутым ротором (АГДП) представляет собой сумму мощностей статора и ротора. Когда машина работает со скоростью выше синхронной, мощность от ротора передается через преобразователь в сеть, когда машина работает со скоростью ниже синхронной, мощность потребляется ротором из сети через преобразователь. Поскольку и статор, и ротор связаны с сетью, генератор называется машиной двойного питания (МДП). На ротор подается напряжение частоты равной разности частоты вращения генератора и частоты сети. Таким образом, на обмотке статора возникает напряжение промышленной частоты.

Рабочий диапазон скоростей вращения ветроустановки с АГДП находится в пределах $\pm 30\%$ от синхронной скорости. Что является достаточным для работы ВЭУ с переменной скоростью по условию изменения скорости ветра. При этом мощность преобразователя можно сделать меньше номинальной мощности обмотки статора и равной произведению максимального скольжения ($s = \pm 0,3$) на номинальную мощность статорных обмоток генератора. Это снижает стоимость, размер и вес ветроустановки.

Однако подключение преобразователя частоты напрямую к сети вызывает в ней генерацию искажений (гармоник), поэтому необходимо использовать различные типы гармонических фильтров (Φ), параметры которого должны быть тщательно просчитаны, чтобы избежать таких колебаний.

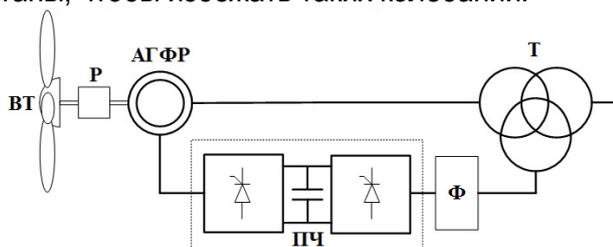


Рис. 3. Ветроэнергетическая установка с АГФР:
 АГФР – асинхронный генератор с фазным ротором;
 Р – редуктор; ПЧ – преобразователь частоты;
 Φ – фильтр; Т – трансформатор

Fig. 3. Wind power plant with an asynchronous generator with a wound rotor: АГФР – asynchronous generator with a wound rotor; Р – gearbox; ПЧ – frequency converter; Φ – filter; Т – transformer

Преимущества:

1) нет необходимости в преобразователе частоты, рассчитанном на полную мощность (снижение стоимости преобразователя, уменьшение веса и размеров преобразователя и фильтра, меньше гармонические

искажения);

2) может регулировать активную и реактивную мощность.

Недостатки:

1) сложность схем управления;

2) наличие скользящих контактов.

4. ВЭУ с синхронным генератором с постоянными магнитами.

В данной ветроустановке используется синхронный генератор с постоянными магнитами (СГПМ, фазные обмотки статора генератора которого подключаются к сети через преобразователь частоты, рассчитанным на полную мощность ВЭУ (рис. 4). Использование СГПМ упрощает конструкцию ВЭУ и упрощает схему управления. В отличие от ветроустановки с АГДП, у СГПМ нет контактных колец системы возбуждения – вместо обмотки возбуждения используются магниты, которые, однако, требуют охлаждения.

Этот тип ВЭУ не имеет редуктора (используется низкоскоростной синхронный генератор с большим количеством полюсов) и позволяет работать в широком диапазоне скоростей ветра, что делает его выгодным решением для современных и будущих ветроустановок. Отсутствие редуктора снижает стоимость ВЭУ и затраты на техническое обслуживание. Однако такой генератор имеет большие размеры, необходимые для размещения большого количества полюсов, что увеличивает стоимость генератора и усложняет его монтаж.

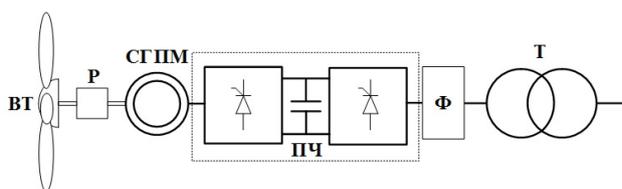


Рис. 4. Ветроэнергетическая установка с СГПМ:
 СГПМ – синхронный генератор с постоянными магнитами; Р – редуктор; ПЧ – преобразователь частоты; Φ – фильтр; Т – трансформатор

Fig. 4. Wind power plant with a permanent magnet synchronous generator: СГПМ – permanent magnet synchronous generator; Р – gearbox; ПЧ – frequency converter; Φ – filter; Т – transformer

Преимущества:

1) обеспечивается работа ВЭУ при наибольшем диапазоне скоростей ветра;

2) отсутствует редуктор, нет проблем с возникающими при порывах ветра механическими напряжениями;

- 3) отсутствует щеточно-контактный аппарат;
- 4) может управлять активной и реактивной мощностью;
- 5) более простые схемы управления.

Недостатки:

- 1) высокая стоимость;
- 2) преобразователь на полную мощность ВЭУ – больше потери в преобразователе, больше генерируемые искажения (гармоники), больше стоимость ПЧ;
- 3) большой вес, габариты и, как следствие, неудобство в монтаже;
- 4) постоянные магниты подвержены размагничиванию, особенно при повышенной температуре эксплуатации.

Нарушения электроснабжения в энергосистемах с высокой долей генерации на основе ВИЭ зачастую связаны с низкой инерцией источников возобновляемой энергии, в схемах выдачи мощности которых используются преобразователи частоты. Из этого следует, что широкое внедрение возобновляемых источников энергии в электрические сети в основном рассматривается как главный фактор, приводящий к снижению инерции энергетических систем. И, как следствие, большое количество исследований в России и за рубежом посвящено улучшению качества управления для ветровых турбин различного типа.

Все предлагаемые в специализированных источниках стратегии управления ветроэлектрическими установками направлены на обеспечение их надежной работы в составе энергосистем с учетом стохастической природы источника энергии и проблем, вытекающих из этого. При этом были проведены исследования [10], показывающие, что с ростом доли ветровой и солнечной энергии в составе электрической сети сильнее проявляются негативные эффекты, влияющие на надежность электроснабжения.

В статье И.М. Кирпичникова, А.С. Мартынова и Е.В. Соломина [11] приведено сравнение основных типов генераторов, применяемых в ветроэнергетических установках, а также способов регулирования электрической мощности, получаемой от ветроэнергетической установки. Предложен вариант построения электронного регулятора, который бы учитывал особенности регулирования мощности в ветроэнергетической установке для достижения максимальной эффективности. Для рассмотренного варианта электронного регулятора предложен

алгоритм регулирования, который бы обеспечил достижение поставленной цели. В статье Пин Хэ, Фушуань Вэнь, Джерарда Ледвича, Юйшэн Сюэ [12] моделируется влияние различных механических возмущающих воздействий на статическую и динамическую устойчивость энергосистемы с ветрогенераторами трех типов – АГКЗ, АГДП, СГПМ. В монографии С.Н. Удалова и В.З. Манусова [13] представлены модели скорости ветра и определены области их использования, математические модели редуктора, асинхронных и синхронных генераторов и преобразователей частоты. Проведен анализ режимов работы ветроэнергетических установок и рассмотрена возможность управления режимами ветротурбины на основе аппарата нечеткой логики с использованием алгоритмов Мамдани и Ларсена. В статье [14] описываются существующие ПИД-регуляторы для управления режимом работы ветроустановки, предлагаются модели, усовершенствующие их функциональность.

Отдельным блоком отслеживаются исследования работы ветроустановок с фиксированной скоростью. Статья [15] посвящена изучению колебаний активной мощности, вырабатываемой ВЭУ с фиксированной скоростью, и их влиянию на энергосистему с построением моделей. В статье [16] выполнено исследование влияния ветровой электростанции на основе ветроустановок с АГДП на динамическую устойчивость в соответствии с требованиями электросетевого кодекса Великобритании. Асинхронный генератор ВЭУ в таких исследованиях чаще всего представлен эквивалентной синхронной машиной [17].

В литературных источниках явно отслеживается приверженность авторов к необходимости использования ветроустановок с регулируемой скоростью. В статье [18] приведено описание преимуществ и недостатков ветроагрегатов с регулируемой скоростью и без нее. Приводится модель поведения ветроустановки при возникновении неисправностей в сети. Модель направлена на поддержание работы ВЭУ в сети без отключения. Представленная в статье [19] модель ВЭС позволяет исследовать динамические характеристики энергосистем, в том числе крупных ветровых электростанций. Благодаря концепции одного так называемого эталонного энергоблока, моделируемого в деталях, и других блоков, замененных простыми источниками

тока, размер и сложность модели были уменьшены, а время моделирования сокращено. В статье с использованием данной модели моделируется участие ветроэлектростанции в первичном регулировании частоты и регулировании напряжения в сети. В статье китайских ученых И Ван, Цзяньхой Мэн, Сянюй Чжан и Ле Сюй [20] исследуется усовершенствованный метод управления активной мощностью ветряных турбин с регулируемой скоростью для улучшения инерционной реакции и способности демпфирования во время переходных процессов. Оптимизированный контроллер отслеживания точки мощности, который сдвигает рабочую точку турбины с кривой отслеживания точки максимальной мощности на кривые в соответствии с отклонением частоты, предлагается для высвобождения «скрытой» кинетической энергии и обеспечения динамической частотной поддержки сети. Такая модель управления обеспечивает виртуальную инерцию (ВИ) источника возобновляемой энергии с силовым преобразователем в схеме подключения к сети. Подробнее об этом способе обеспечения ВИ и других будет описание в 3 разделе.

При исследовании работы ВЭУ с регулируемой скоростью АГДП и СГПМ могут рассматриваться вместе или отдельно. Например, в данной работе [21] предлагается стратегия управления демпфированием для улучшения динамических характеристик АГДП или DFIG (в англоязычной версии – Doubly Fed Induction Generator) за счет модели управления напряжением с модулем управления демпфированием. Динамическая устойчивость после интеграции ветропарка подробно анализируется на примере системы из двух зон с четырьмя машинами, а также подтверждается доступность данной стратегии управления демпфированием. Однако более популярным для исследований в последнее время является ветроагрегат с СГПМ или PMSG (в англоязычной версии Permanent Magnet Synchronous Generator). С ростом популярности ветрогенераторов с СГПМ требуется комплексное моделирование и анализ ВЭУ для исследования ее динамической устойчивости и взаимодействия между крупным ветропарком и электросетями. В работе [22] для моделирования такого ветрогенератора разработана подробная схема ветроэнергетической установки с переменной скоростью вращения, основанная на синхронном генераторе с постоянными магнитами и

полномасштабном IGBT-преобразователем с источником напряжения. Эта схема управления включает в себя как наиболее часто применяемую операцию отслеживания максимальной точки мощности, так и стратегию независимого управления активной/реактивной мощностью с двойным ШИМ. Кроме того, в этой модели разработана и реализована схема защиты от перенапряжения в звене постоянного тока. Эффективность предложенной схемы управления и защиты оценивается с помощью серии имитационных исследований в условиях переменной скорости ветра и трехфазного возмущения сети. Результаты моделирования показывают, что модель обладает желаемыми возможностями работы в точке максимальной мощности, а также улучшенной функцией защиты от снижения напряжения (в англоязычной версии LVRT – Low Voltage Ride Through). В статье [23] представлена стратегия управления мощностью СГПМ для динамической поддержки частоты системы. В контроллер мощности инвертора со стороны сети добавляется дополнительный контур управления активной мощностью. Он используется для достижения эффективной реакции сети на инерцию, поскольку инерция энергосистемы отражает свойство системы сопротивляться изменениям частоты. К регулятору реактивной мощности добавляется дополнительный контур управления реактивной мощностью для улучшения характеристик демпфирования системы. Результаты моделирования показывают, что динамическая стабильность частоты сети может быть улучшена с помощью предложенной стратегии управления.

В специализированных источниках также представлены такие способы регулирования работы ВЭУ, как пуск и отключение турбин в ветропарках [24], применение гибридной ветро-батареи системы [25], где демпфирование колебаний мощности производится с помощью литий-ионных или других типов аккумуляторов. В статье [26] рассматривается метод повышения предельной мощности ветровых электростанций и статической и динамической устойчивости систем благодаря использованию в составе ветропарков аккумуляторных систем накопления энергии. Определены номинальная мощность систем накопления энергии и предельная рабочая мощность ветровых электростанций для энергосистемы. В статье [27] Мд.Н.Х. Шазон, Н. Масуд, Н.М. Ахмед, С.Р. Диба, Э. Хоссейн пред-

лагают схему определения размеров систем накопления энергии, чтобы сгладить значительные изменения выходной мощности от стохастических источников. Авторы рассматривают эффективность системы накопления и оптимальную диспетчеризацию систем накопления энергии. Основная цель этой работы – получить оптимальный размер накопителя энергии. Тем не менее стратегия определения размеров не учитывает никаких других условий работы системы, и реализация этого алгоритма не зависит ни от каких параметров системы. При этом в работе российского ученого Д.Н. Карамова [28] представлена математическая модель автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии и аккумуляторные батареи. Описаны принципы распределения нагрузки по агрегатам с определением основных эксплуатационных параметров с заданным шагом дискретизации. Применение разработанной модели демонстрируется на примере оптимизации состава оборудования реальной автономной системы электроснабжения. Данным автором также разработаны другие модели автономной системы электроснабжения [29], учитывающей детальный график нагрузок потребителя, стохастичность интенсивности солнечного излучения, температуры окружающей среды, электрические потери, основные эксплуатационные параметры СЭС и более детально принимающей во внимание случайный характер скорости ветра. Другими отечественными учеными тоже поднимается вопрос об использовании ВИЭ в изолированных энергосистемах. Так, О.С. Пепель в своей статье [30] анализирует возможности создания автономных энергоустановок, работающих только на возобновляемых источниках энергии, среди которых солнечная и ветровая энергии являются наиболее универсальными и повсеместно доступными. Приведена концепция автономной установки ВИЭ, произведено математическое моделирование установок. Монография С.Н. Удалова и А.А. Ачитаева [31] посвящена вопросам управления и динамической устойчивости ветроэнергетической установки, подключенной к изолированной электроэнергетической системе. Рассматриваются вопросы поддержания номинальной скорости вращения синхронного генератора, в котором применен принцип управляемой гибкой связи турбины и генератора, работающего при различных режимах и видах нагрузок, что позволяет

управлять скоростью вращения генератора ВЭУ напрямую. Авторы в своих трудах [32–34] проводят последовательные исследования возможности поддержания синхронной работы генераторов СГПМ, а также стабилизации скорости вращения при перегрузке за счет применения магнитной трансмиссии.

В целом все системы управления можно поделить на централизованные и децентрализованные. Централизованная система является классической надежной основой управления энергосистемой России, однако она неэффективна [35] для управления большим числом ВИЭ, с различных точек зрения, т.к. гибкое управление этими распределенными источниками энергии является очень сложной задачей для централизованной структуры энергосистемы. В результате энергосистемы за рубежом, в которых значительную долю мощности вырабатывают ВИЭ, развиваются в сторону более децентрализованной формы управления, что поддерживает гибкую и безопасную работу распределенных источников энергии и помогает использовать максимальное количество зеленой энергии.

Таким образом, децентрализованная система управления для больших ветроэнергетических станций имеет большую эффективность, чем централизованная. Связано это с тем, что в составе ветропарка каждая отдельная ветроустановка работает в условиях, отличающихся друг от друга. Эти условия отличаются вследствие различных ветровых потоков на площади установки ветроагрегатов электростанции, наличия ветрового следа от впереди стоящих ветроустановок, разных характеристик турбин, а также в составе ВЭС могут быть установки разных типов, производителей и номинальных мощностей, размеров и т.д. Поэтому централизованная команда не может быть наиболее эффективна для всех ВЭУ сразу, а с индивидуальными командами централизованное управление справиться не может, либо структура такой системы будет сложной и дорогостоящей.

Поэтому для работы ВЭС в изолированных энергосистемах развивается концепция микросетей, а для подключения ветростанций к централизованной системе управления разрабатывается концепция виртуальной электростанции. Подробнее об этих двух концепциях речь пойдет в разделе 2.

При этом в составе ВЭС управление ветроустановками может координироваться или не

координироваться. Существуют отдельные исследования, показывающие, что скоординированное управление ВЭУ обеспечивает лучшую частотную характеристику и устойчивость к переходным процессам [36].

Одной из наиболее эффективных концепций управления отдельными установками генерации электроэнергии на основе ВИЭ является концепция мультиагентного управления (МАУ). В статье А.Г. Фишова, С.Т. Исмоилова и С.С. Труфакина [37] дается определение понятию «мультиагентное управление», указываются принципы и правила осуществления мультиагентного регулирования с участием распределенной генерации. Под мультиагентным управлением понимается вся совокупность мер, принимаемых каждым из субъектов процесса (сетевой компанией, потребителем электроэнергии, генерацией), для достижения собственных целей в рамках единых принципов и правил, обеспечивающих компромиссный режим работы электрической сети. Приведено обоснование превосходства мультиагентного регулирования над централизованным в системах с распределенной генерацией. В работе С. МакАртура, Э.М. Дэвидсона, В.М. Каттерсона, А. Димеаса, Н. Д. Хацитаргириу, Ф. Понци, Т. Фунабаши [38] исследуется потенциальная ценность технологии МАУ для энергетики, описаны фундаментальные концепции и подходы в области мультиагентных систем. В ней также определены технические вопросы, которые необходимо решить, чтобы ускорить и облегчить внедрение технологий МАУ в электроэнергетике.

Большое количество разработок в области мультиагентного управления сделано зарубежными учеными коллективами. Авторы А. Салим, М. Линд, М.М. Велозо в [39] описывают свою работу по разработке мультиагентной системы для реализации защиты и управления системами электроснабжения. Представляются результаты использования предлагаемой схемы в реалистичных симуляциях. Описываются недостатки работы традиционных защит и способов управления электроснабжением в электроэнергетических системах с распределенной генерацией. В статье Дж. Соланки, С. Хушалани Соланки, Н. Шульца [40] описан метод быстрого и эффективного восстановления электроснабжения энергосистем с распределенной генерацией за счет сброса нагрузки с учетом приоритета потребителей. Алгоритм распределения нагрузки с алгоритмом восстановления электроснабжения

выполняет сброс нагрузки и восстанавливает нагрузки для систем с распределенной генерацией. Методика основана на мультиагентном подходе. В этой статье [41] тех же авторов представлены подробные сведения о мультиагентном регулировании, об алгоритме, восстанавливающем энергосистему после сбоя. Описывается поведение и коммуникация агентов. Мультиагентное регулирование тестируется на двух тестовых системах и обеспечивает как полное, так и частичное восстановление, включая приоритизацию распределения нагрузки и отключения потребителей. Авторы А. Кумар, Л. Тивари, Д. Сомванши в [42] представили микросеть с ВЭС, СЭС и дизель-генератором. Осуществляется баланс мощности и оптимальное распределение нагрузки в течение суток. Вычисляется экономический эффект. Дается алгоритм оптимального распределения нагрузки. Рассматривается архитектура мультиагентного управления.

При этом мультиагентная система управления может иметь или не иметь в своем составе центральный агент, осуществляющий координацию между отдельными кластерами установок в составе электростанции. В статье Ливэй Цзюй, Ци Чжан, Чжунфу Тань, Вэй Ван, Хэ Синь, Цзэхао Чжан [43] представляется трехуровневая (с центральным агентом) мультиагентная система для управления несколькими микросетями в составе распределенной сети. В состав сети рассматриваются ВЭУ, СЭС, газовые мини-ТЭЦ, системы накопления энергии и регулируемая нагрузка (потребители). Рассматриваются различные ситуации, в том числе аварийные. Интересна ситуация с аварийным отключением центрального агента, в этом случае сеть переходит на работу в островном режиме. Большой упор делается на работу накопителей энергии. В [44] рассматривается распределенная генерация Венгрии.

Предлагается мультиагентное управление распределенной генерацией с центральным агентом. Рассматривается модель оптимального распределения нагрузки между разными агентами (ВЭС, газовыми мини-ТЭС, МГЭС). Моделирование скорости ветра основано на моделях с параметрами, адаптированными к реальным зарегистрированным данным ветровых электростанций.

Однако система управления может быть и без центрального агента. В статье Ян Гао, Цянь Ай [45] рассматривается мультиагент-

ный алгоритм управления ветряной электростанцией в составе сети с распределенной генерацией. Используется принцип «ведущий – ведомый». Рассматривается ситуация с потерей связи (отключением) ведущего агента, предлагается алгоритм работы. В статье [46] Ю.Н. Булатовым и А.В. Крюковым предложены проектирование, описание модели многоагентной системы управления установками распределенной генерации на базе турбогенераторов. Представлены основные функции агентов сети. Рассмотрена система дифференциальных уравнений, определяющая процессы в системе электроснабжения, в том числе на объектах распределенной генерации.

В завершение данного раздела можно сделать вывод о том, что проблемы интеграции ветроэнергетических установок в энергосистемы связаны с их стохастическим характером выработки электроэнергии. Вследствие данного факта ветроустановки невозможно эффективно применять без использования силовых выпрямительно-инверторных преобразователей. Их применение разрывает инерционную связь электрических машин ветроустановок с системой и снижает надежность электроснабжения потребителей. Вышеуказанными авторами предлагаются различные стратегии управления, которые помогают нивелировать эти негативные эффекты. Однако в большинстве случаев в этих работах не учитываются различные условия работы отдельных ветроустановок в составе ветропарка. Ветер рассматривается как статичный параметр, не берется во внимание различное распределение ветрового потока между агрегатами ввиду их географической распределенности, не учитывается ветровой след и т.д. На основании проведенного литературного обзора можно сделать вывод о том, что учет этих особенностей может быть реализован с использованием архитектуры мультиагентного скоординированного управления.

2. МИКРОСЕТЬ И ВИРТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ

Существует ряд определений микросетей, которые можно найти в специализированных источниках [35]. Как общее определение – микросеть – это взаимосвязанная группа источников генерации и нагрузок, которая организована внутри определенных электрических границ и работает как единое

управляемое устройство по отношению к сети. Или это можно объяснить просто как маломасштабную систему или сеть, предназначенную для снабжения электроэнергией небольшого целевого числа потребителей. Эти микросети могут работать как с подключением к сети, так и без подключения к сети (в островном режиме). Ряд российских ученых занимается изучением микросетей. Так, в своей статье [47] П.Е. Воробьев описывает понятие микросетей, достоинства, недостатки, область применения и проблемы. Статья связана с темой повышения динамической устойчивости микросетей с электронной генерацией. Формулируется система нелинейных дифференциальных уравнений третьего порядка и анализируется их решение.

Поддержание качества электроэнергии по напряжению и частоте для микросети, работающей в изолированном режиме, является сложной задачей. Был проведен ряд исследований и предложены модели управления для островного режима работы микросетей [48]. Как правило, микросеть состоит из системы управления энергопотреблением, системы управления генерацией, системы накопления энергии, потребителей и источников энергии. Микросети могут включать генерацию и нагрузки с различными характеристиками [49]. В статье Дж. К. Бомер, М. Гибеску, В.Л. Клинг [50] описываются модели систем с распределенной генерацией.

Микросеть применяется для более эффективного распределения нагрузки между небольшими источниками генерации, имеющими разные условия работы. В России микросети могут быть применены для электроснабжения удаленных потребителей электроэнергии в изолированных от общей энергосистемы (ОЭС) районах, где подключение к ОЭС экономически нецелесообразно или технически невозможно. В таких районах обычно применяются дизельные генераторы небольшой мощности. Благодаря микросетям в эти системы можно внедрить ВИЭ, тем самым повысив надежность электроснабжения, уменьшив выбросы вредных веществ в атмосферу и снизив потребление дорогостоящего топлива и тарифы на электроэнергию [51]. Подобные исследования были проведены К.Э.Н. Якиным, М. Менаа, М. Хасни, М. Будуром. В данной статье [52] представлена разработка новой эффективной стратегии управления для повышения стабильности

частоты изолированной гибридной ветродизельной системы на основе микросети. Предложенная методология управления включает в себя управление частотой нагрузки, согласованное с системами накопления энергии от батарей. Разработанный ими оптимизационный алгоритм был применен для создания интеллектуальной схемы управления частотой в сети при изменении нагрузки с учетом интеграции ветропарка. В целом предложенная стратегия управления может быть полезна для определения необходимой мощности управления частотой нагрузки при наличии рассредоточенных генерирующих установок. Э. Мулджади, Е.П. МакКенна в [53] исследовали качество электроэнергии и взаимодействие дизельной генерации, ветряной турбины и местной нагрузки. Цель этой статьи – показать влияние ветряной электростанции на всю систему. Показано, как запуск ветряной турбины и переходное состояние при изменении нагрузки влияют на напряжение и частоту в системе.

Применение микросетей имеет значительные преимущества. Среди них – снижение общего потребления электроэнергии и негативного воздействия на окружающую среду, надежное энергоснабжение и более высокая энергоэффективность, по сравнению с централизованными сетями, снижение потерь при передаче, гибкое управление напряжением и частотой. Увеличение числа возобновляемых источников энергии ставит перед централизованной сетевой структурой различные проблемы, связанные с надежностью, качеством электроэнергии, стабильностью частоты и т.д. [54]. В качестве решения этих проблем могут быть применены микросети с аккумуляторными батареями [55]. Накопление энергии и компенсация реактивной мощности могут свести к минимуму дисбаланс активной/реактивной мощности, который может повлиять на окружающую энергосистему. В этой статье показано, как вклад ветряных электростанций влияет на сеть распределения электроэнергии и как сеть распределения электроэнергии, накопление энергии и компенсация реактивной мощности взаимодействуют при изменении ветра. Использование таких систем микросетей очень выгодно для потребителей, поскольку потребление электроэнергии в часы пик может быть получено с использованием энер-

гии, хранящейся в аккумуляторной батарее [56].

Существуют проблемы, возникающие на практике при интеграции микросетей. Это сбои в работе защит, проблемы с качеством электроэнергии (частотой, напряжением), переходные и установившиеся пониженные или повышенные уровни напряжения, увеличение токов короткого замыкания [57] и др. Обеспечение автономной работы алгоритмов управления и защиты микросетей является сложной технической задачей [58]. Проблемы оптимизации управления энергопотреблением в микросетях обсуждаются в [59]. Поэтому актуальной является разработка систем управления микросетями.

В основном существует два типа систем управления. Это децентрализованные системы управления и централизованные системы управления. При работе централизованных систем управления контроллер планирует и контролирует работу микросети в зависимости от измеренных данных и состава системы. Для этой операции состояние системы должно быть введено в контроллер. В децентрализованных системах управления компоненты микросети работают более автономно и независимо.

В данном обзоре рассматривается работа мультиагентной системы управления микросетями. Мультиагентная система управления представляет собой интегрированную и распределенную систему из нескольких программных агентов [60].

Традиционным методом, используемым для этого контроля и мониторинга, являются системы диспетчерское управление и сбора данных, которые в основном работают централизованно и автоматизируют, координируют, взаимодействуют и контролируют работу подсистем, расположенных в удаленных местах. Прерывистая природа генерации электроэнергии ВИЭ вносит неопределенность в системы диспетчерского управления [61]. Мультиагентная система управления может справиться с этими проблемами лучше, чем системы централизованного диспетчерского управления, более успешно контролируя ВИЭ благодаря надежной связи и организованной структуре. Для надежной работы в микросети необходимо осуществлять непрерывный мониторинг и контроль за ветровой и солнечной энергией, уровнями заряда батареи, нагрузками и динамическим ценообразованием.

Агенты мультиагентной системы взаимодействуют друг с другом для достижения определенного набора целей или выполнения определенных задач. Каждый агент имеет программное обеспечение, которое выполняет автономные, логические или предопределенные действия для достижения целей данной системы [62]. Эти агенты обладают самонастраивающимися функциями, такими как автономия, масштабируемость и гибкость, а также способностью решать системные проблемы любой степени сложности в составе команды. У мультиагентной системы есть такая возможность, поскольку эти агенты, или интеллектуальные и автономные единицы, работают как группа для выполнения общих требований к системе. Агенты способны обмениваться информацией между друг другом через двунаправленные каналы связи. Передача данных или информации может запускаться либо по событию, либо по времени. При передаче данных, запускаемой по времени, агенты собирают данные с помощью датчиков, обрабатывают их и обмениваются ими с другими соответствующими агентами через заранее определенные интервалы времени. При передаче данных по событию агенты обмениваются ими только тогда, когда в сети происходит определенное изменение или в качестве запланированной задачи.

Каждый агент сравнивает потребность в мощности с генерацией и, если потребность выше, чем генерация, дает команду на пуск дополнительного источника питания для работы наиболее оптимальным способом. Также, если генерируемая мощность превышает необходимую потребность, агент выдает команды для передачи мощности на соответствующие нагрузки и/или снижение выработки мощности / отключение части генерации. Если возможно, избыточная энергия сохраняется в аккумуляторных батареях. Таким образом, многоагентная система может быть спроектирована для оптимизации работы микросети, основанная на многоагентной концепции. Эта структура позволяет центральному агенту управления работать в режиме быстрого управления и оптимизировать работу микросети как в изолированных сетях, так и в составе энергосистемы. Для этого центральный агент регулирует мощность различных источников энергии. Поскольку микросети содержат

источники возобновляемой энергии, такие как солнечные и ветряные электростанции, частота системы может колебаться, а поддержание постоянной частоты системы является сложной задачей. Для стабильного управления частотой очень важно осуществлять баланс мощности в микросети.

Мультиагентная система управления очень удобна, когда возникает необходимость добавить в микросеть новый источник питания. Это можно сделать без внесения каких-либо изменений в существующие устройства, что является очень существенным преимуществом. Микросеть на основе МАУ может корректировать системные дисбалансы и провалы напряжения [64]. Микросети могут соответствовать высоким требованиям к динамическим нагрузкам [65]. Кроме того, традиционные централизованные микросети очень сложны, имеют большую инфраструктуру для каналов связи и очень высокую сложность центрального управляющего устройства. Но в микросетях на основе МАУ локальные агенты работают автономно, они несут ответственность за действия в отношении локальных событий в зависимости от локальной информации [66]. Это основная идея мультиагентной концепции [67]. В статье [68] демонстрируется применимость базовой концепции иерархической многоагентной системы для распределенного управления микросетью. Другая модель распределенного управления на основе МАУ для микросетей обсуждается в [69]. В системах на основе нечеткой логики и алгоритмах на почве для прогнозирования нагрузки и планирования генерации может использоваться искусственный интеллект. В [70] предлагается многоагентная система управления энергопотреблением для управления распределенными источниками на основе затрат на топливо, потребностей в мощности в микросетях (диспетчеризируемых и недиспетчеризированных нагрузок), выбросов в окружающую среду, расхода топлива и т.д. Многоагентные системы могут использоваться для того, чтобы сделать микросети более экономически целесообразными. Концепции, основанные на МАУ, предлагаются для процессов восстановления питания микросетей [71–72].

Альтернативой концепции микросетей является концепция виртуальной электростанции [73]. Виртуальная электростанция – это довольно новая концепция. Эта идея

имеет несколько преимуществ, работающих в ее пользу. Основная концепция основана на централизованной структуре управления, которая соединяет, контролирует и визуализирует работу распределенных генераторов. Комбинированные генераторы тепла и электроэнергии (ТЭЦ), топливные элементы (ТЭ), фотоэлектрические установки (ФЭ), ветроустановки и любые другие источники электроэнергии и тепла могут взаимодействовать друг с другом на локальной территории. Это хорошее решение для использования ВИЭ, имеющих нерегулярный график работы, что создает серьезные проблемы для диспетчеризации.

Таким образом, виртуальная электростанция позволяет представить несколько различных по условиям работы источников энергии, систем накопления энергии как единую станцию. Эта концепция может быть полезна для текущего исследования, так как позволяет интегрировать большие ветропарки в энергосистему с сохранением наиболее оптимальной работы каждой установки составе электростанции. В статье Цзюньжу Чэнь, Муян Лю, Ф. Милано [74] описывается использование виртуальной электростанции для управления источниками энергии в энергосистемах. Для анализа переходных характеристик системы необходима динамическая модель виртуальной электростанции. В статье предлагается упрощенная, но точная агрегированная модель для представления переходных процессов виртуальной электростанции для анализа устойчивости энергосистем, подходящая для системных исследований и оценки влияния виртуальной электростанции на общую сеть. Результаты моделирования показывают, что с помощью этой модели можно изучать динамическую реакцию сети без потери точности и без необходимости подробно моделировать сеть и различные блоки в составе виртуальной электростанции. В статье [75] описывается подход к распределению электроэнергии от распределенных источников энергии и систем накопления энергии к потребителям, основанный на понятии «виртуальной электростанции». П. Мутис, П.С. Георгилакис и Н.Д. Хацитаргириу в [76] предложен новый метод поддержки напряжения вдоль распределительной линии. Этот метод основан на внедрении виртуальной электростанции. Идея предлагаемого метода заключается в том, чтобы распределять гене-

рируемую мощность между потребителями, задействуя при этом только близкорасположенные мощности распределенных источников энергии, минимизируя расстояния передачи электроэнергии.

Внутри структуры виртуальной электростанции осуществляется управление отдельными источниками энергии. Управление может быть централизованным или децентрализованным. В каждой модели виртуальной электростанции осуществляется обмен и сбор информации. При этом управление может быть децентрализованным, но информационный центр все равно будет. Он необходим для сбора информации об агентах в режиме реального времени, ее обработки и общей оптимизации. Для функциональности такого центра необходима достаточная пропускная способность каналов связи и высокоскоростной алгоритм обработки данных.

Централизованное управление теоретически может обеспечить наибольшую эффективность работы виртуальной электростанции. Такой центр представляет собой объект диспетчеризации внутри станции. Однако в процессе оптимизации работы установок внутри электростанции необходимо учитывать множество переменных, что усугубляет сложность расчетов для центра управления, вследствие чего такой тип управления не может достичь своей эффективности. В данной статье [77] Вэйлинь Чжун, Цзюньжу Чэнь, Муян Лю, М.А.А. Мурад, Ф. Милано дают скоординированный метод управления виртуальной электростанцией для улучшения краткосрочных переходных частотных характеристик энергосистемы. Предлагаемая стратегия основана на скоординированном управлении распределенными источниками энергии, системами накопления энергии. Различные режимы управления сравниваются и проверяются с помощью моделирования методом Монте-Карло. Также описывается влияние задержек связи, возмущений и пропускной способности ESS на общее переходное поведение. Предлагаемый подход может значительно улучшить стабильность частоты энергосистемы, но задержки связи оказывают существенное влияние на качество переходных процессов. Для снижения негативного влияния задержки без увеличения пропускной способности предлагается двухэтапное согласованное управление. В этом режиме работы системы нако-

пления энергии действуют первыми, тогда как распределенные источники энергии включаются в координированное управление на втором этапе. Это снижает влияние ограниченной мощности систем накопления и улучшает переходную устойчивость.

Метод децентрализованного управления делит виртуальную электростанцию на два уровня. Первый уровень – центральный уровень связи, второй представляет собой независимые установки внутри станции. При этом каждая установка сама определяет наиболее эффективный режим работы, учитывая общее задание от центра. Это значительно облегчает вычислительную нагрузку, однако из-за отсутствия централизованной оптимизации установки могут противоречить друг другу и работать нескоординировано. Сюаньхай Синь, Дэцян Гань, Найху Ли, Хуэйцзэ Ли, Чэньсун Дай в своей работе [78] представляют алгоритм децентрализованного согласованного управления выходной мощностью распределенных источников энергии в составе виртуальной электростанции. Представлена модель, предполагающая работу источников генерации с оптимальной выходной мощностью, которая определяется затратами на генерацию и необходимыми услугами, назначенными распределительной сетью. Для каждого отдельного источника в составе виртуальной электростанции стратегия требует информацию только от соседних источников, что делает сети связи между ними стандартными и надежными. В. Хеберле, М.В. Фишер, Э.П. Араужо, Ф. Дорфлер предлагают многопараметрический подход к управлению динамическими виртуальными электростанциями с целью предоставления требуемых динамических вспомогательных услуг в виде быстрого управления частотой и напряжением [79]. В статье используется стратегия адаптивного управления, которая учитывает внутренние ограничения электростанций и может надежно обрабатывать изменчивость погодных условий. Модель, представленная в статье, показывает успешную работу стратегии управления для улучшения частотной характеристики исходной системы.

Концепция виртуальной электростанции популярна в научных кругах за рубежом. В статье Дж. Бьорка, К.Х. Йоханссона, Ф. Дорфлера [80] представлена модель виртуальной электростанции, включающая в себя гидроэлектростанцию и ветроэлектростан-

цию. Моделировалось отключение части генерации. Для оценки возможной выходной мощности виртуальной электростанции с учетом неопределенностей в этой статье [81] предлагается концепция кривой RCC. Очевидно, что RCC явно отображает допустимый диапазон выходов P и Q от виртуальной электростанции, который может быть выполнен при хеджировании от непредвиденных колебаний. Р.А. Ахангар, А. Шейхолеслам рассматривают алгоритм управления крупными источниками возобновляемой энергии, который получил название «объемная виртуальная электростанция» [82]. Такая электростанция включает в себя мощные ветровые, солнечные электростанции, а также системы накопления электроэнергии. Взаимодействие между различными видами генерации осуществляется через центры управления и реализуется по схеме ведущей энергоустановки.

При наличии большого количества ВИЭ, подключенных к виртуальной электростанции посредством выпрямительно-инверторных преобразователей, важно учитывать низкую инерцию такой станции при ее работе в составе энергосистемы. В своей статье Вэйлинь Чжун, Г. Цунас, Муян Лю и Ф. Милано представляют метод оценки в режиме реального времени, изменяющийся во времени инерции, обеспечиваемой виртуальными электростанциями [83]. Предлагаемый метод основан на оценке скорости изменения активной и реактивной мощностей в точке соединения ВЭС с остальной сетью. Для формулы оценки эквивалентной инерции виртуальной электростанции используется расчетное реактивное сопротивление сети. Результаты моделирования показывают, что предложенный метод хорошо работает для синхронных машин.

Рассмотренная в данном разделе специализированная литература позволяет сделать вывод о том, что при строительстве крупных энергообъектов на основе ВИЭ их стоит объединять в микросеть вместе с потребителями для изолированных от энергосистемы районов или в виртуальную электростанцию для ее последующей интеграции в общую энергосистему. Среди ученых кругов популярной является идея мультиагентного управления установками внутри созданных объектов. При этом делается вывод о том, что применение полностью децентрализованного варианта такой схемы

управления не является наиболее эффективным решением. Минимальная общая координация работы установок с учетом их количества является наиболее целесообразным методом. Однако существуют проблемы, связанные с низкой инерцией таких систем, а также в необходимости обеспечения оказания услуг по регулированию частоты в энергосистеме. Эти вопросы рассмотрены в разделе 3.

3. ПОДДЕРЖКА ЧАСТОТЫ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ. ВИРТУАЛЬНАЯ ИНЕРЦИЯ

Рост установленной мощности от источников возобновляемой энергии, в том числе ветрогенерации за рубежом привели к тому, что операторами систем были выдвинуты требования к участию этих объектов генерации в первичном регулировании частоты и мощности наряду с традиционными электростанциями. Это происходит потому, что суммарная доля ВИЭ становится сопоставимой с мощностью крупных системных станций.

В России также активно развивается возобновляемая электроэнергетика. Укрупненное расположение больших мощностей ВИЭ и системные проблемы, связанные с этим, в конечном итоге приведут к необходимости обеспечения оказания ими системных услуг.

Еще одним негативным фактором, влияющим на стабильность энергосистемы с большой долей генерации ВИЭ, является низкая инерция установок, подключенных к сети через силовые преобразователи. При большой доле ветровой или солнечной генерации в составе энергосистемы это вызывает снижение ее надежности, выражающееся, в частности, в увеличении амплитуды колебания частоты в сети при нарушении баланса мощности. Например, даже небольшое отключение части генерации, которое в системе с традиционными источниками энергии за счет их инерции не привело бы к значительному снижению частоты, а впоследствии было бы оперативно скорректировано, в энергосистеме с высокой долей ВИЭ может привести к падению частоты, а при отсутствии необходимых алгоритмов управления – к устойчивому снижению, коррекция которого может быть выполнена только через достаточно длительный промежуток времени с использованием вторичного регулирования.

Существуют различные подходы к поддержанию частоты в энергосистеме ветроэлектрическими установками с силовыми преобразователями. Для обеспечения возможности участия ВЭУ в первичном регулировании возможно либо применение систем накопления энергии, либо работа ветроустановки с не максимальной мощностью, оставляя регулировочный запас. Запас обеспечивается за счет работы ветряка с неоптимальным углом поворота лопастей турбины.

Однако обеспечение возможности участия в первичном регулировании частоты не решает проблему с низкой инерцией, т.к. изменение мощности ветряка данными средствами является недостаточно быстрым. Быстрее с этим справляется так называемая виртуальная инерция. Виртуальная инерция основывается на создании специальных алгоритмов управления, реагирующих на возникновение частотного события, и заключается во временном изменении скорости вращения ротора во время работы ветровой турбины для высвобождения/поглощения части кинетической энергии, накопленной во вращающемся теле ветровой турбины на короткое время, чтобы быстро реагировать на переходные изменения по частоте. Виртуальная инерция обеспечивается работой ветроустановки не в точке оптимума на кривой отслеживания максимальной мощности, при работе в которой повышается частота вращения. Кинетическая энергия, накопленная во вращающихся частях, реализуется при работе алгоритма. Также виртуальная инерция может обеспечиваться установкой в звене постоянного тока преобразователя суперконденсаторов большой емкости, энергия в которых может мгновенно реализоваться/поглотиться при нарушении баланса мощности.

Зарубежными учеными коллективами достаточно подробно разбираются различные аспекты поддержания частоты в энергосистеме с помощью ветроустановок. В статье [84] Пэнфэй Ли, Вэйхао Ху, Жуй Ху, Ци Хуан, Цзюнь Яо, Чжэ Чэнь предоставляют стратегию управления частотой в энергосистеме с большой (20%) долей ВЭУ. Предлагается работа ВЭУ в режиме разгрузки турбины. Строятся модели. Модели учитывают, что в составе ВЭС присутствуют ВЭУ с разными расположением и скоростью ветра на входе и, как следствие, с различным потенциалом регулирования. В статье [85] рассматривается стратегия поддержки частоты за счет кинети-

ческой энергии в ветровых электростанциях. На основе теории Курамото, которая широко применяется в многоагентных системах и интеллектуальных сетях для анализа переходной устойчивости сетевых систем, проанализирована устойчивость энергосистемы с высоким содержанием ветряных электростанций, выведено и математически доказано достаточное условие устойчивости. В статье [86] подробно рассматриваются методы обеспечения запаса мощности ветротурбины и его использования при необходимости поддержания частоты. Рассматриваются минусы существующих методов. Предлагается метод регулирования падения частоты путем изменения коэффициента слежения за мощностью ветровой турбины, что позволяет поддерживать работу турбины в режиме максимальной мощности до введения вторичных и третичных резервов мощности в энергосистеме. Л.А.Г. Гомес, Л.Ф.Н. Лоренсо, М.В.С. Саллес, А.П. Грило, А.Дж. Сгуарези [87] анализируют классические методы поддержания частоты в сети посредством ВЭС. Показано, что на качество переходного процесса влияет также расстояние от нагрузки до генерации. Чем меньше расстояние, разделяющее нагрузку и генерацию, тем ниже снижается частота в момент возмущения.

Для достижения наилучших результатов поддержания частоты в сети необходима комбинация указанных подходов. Так, М. Надур, А. Эсадки, Т. Насер [88] рассматривают методы поддержания частоты в энергосистеме с помощью ветроустановок с асинхронным генератором с двойным питанием DFIG (от англ. Doubly-Fed Induction Generator). Искусственная инерционная реакция, управление падением скорости и управление углом поворота лопастей могут использоваться вместе, чтобы еще больше улучшить возможности регулирования частоты. Чтобы дополнительно обеспечить относительно длительную поддержку регулирования частоты Сюэ Лю, Ювэй Цзя и Чжаоян Дун [89] предложена стратегия нечеткого управления для динамического регулирования прироста инерции. Предлагаемая структура сочетает виртуальный контроль инерции и первичный контроль частоты. При этом в модели учитывается эффект следа от вперёдстоящих ВЭУ, управление виртуальной инерцией настраивается в соответствии со скоростью ветра. Также эффект следа подробно изучается Сингхом Н., Де Кунингом

Дж.Д.М., Вандевельде Л. [90]. Эффект следа был проанализирован в нескольких местах с подветренной стороны ветряной турбины с помощью модели Дженсена. Показано, как колебания ветра из-за наличия следового эффекта влияют на частоту сети. Видно, что колебания частоты сети повторяются в поведении следа, что свидетельствует о наличии динамического взаимодействия. Также отчетливо видны преобразования интенсивности этого эффекта при изменении расстояния за ветряком. Также замечено, что величина поддержки частоты, обеспечиваемой ветряной турбиной, и наклон изменяющейся частоты сети также являются активными переменными, влияющими на след.

Цзяньбэй Си, Хуа Гэн, Сюэян Хэ в [91] анализируется традиционная схема управления виртуальной инерцией ветрогенератора с использованием метода создания виртуального синхронного генератора. Делается вывод о том, что при использовании характеристики скорости изменения частоты кинетическая энергия, запасенная в ветровой турбине, при наступлении частотного события используется с неполной эффективностью. Кинетическая энергия ротора ветровой турбины может быть использована более эффективно за счет регулировки коэффициента инерции в соответствии как со скоростью вращения ротора, так и с частотой сети. В статье [92] описывается стратегия работы ветряной турбины в режиме разгрузки, основанная на нечеткой логике, чтобы эффективно участвовать в схеме поддержания частоты в энергосистеме за счет существования запаса по мощности. Кроме того, в модель добавлена связь, учитывающая влияние изменения напряжения на частотную характеристику.

Наиболее часто встречающийся тип регулятора для алгоритма виртуальной инерции – пропорционально-дифференциальный. Х. Беккер, М.Ф. Валуа-Родригес, Л. Холицкий, К. Малекян, П. Гартманн в процессе исследований [93] было обнаружено, что поддержка частоты, обеспечиваемая ВЭУ, может быть увеличена за счет более детальной настройки параметров контроллеров (пропорционального и дифференциального коэффициентов регулятора). Определение параметров регулятора является сложной задачей. В статье [94] предлагается метод определения параметров контроллера ветротурбины с АГДП без учета влияния изменения скорости ветра. Однако в реальной практике из-за изменения

скорости ветра параметры контроллера необходимо постоянно анализировать. С. Моровати, Х. Пулгар-Пайнемалем [95] представлен новый механизм координации для ветроустановок с АГДП для улучшенного регулирования частоты. Координация была достигнута с помощью интеллектуальной нейронной системы со структурой с прямой связью и обратным распространением; сеть состоит из входного, скрытого и выходного слоев. Результаты показывают, что предлагаемая координация позволяет снизить падение частоты примерно на 22%. Люшэн Чжан, Чжэнь Се, Юйян Чан, Хун Чжу [96] разработали стратегию адаптивного управления виртуальной инерцией DFIG, основанная на экспоненциальной функции. Стратегия позволяет не только быстро реагировать на падение частоты, но и улучшать самую низкую точку падения частоты системы. При этом для эффективного демпфирования колебаний частоты и напряжения предлагается использовать классический автоматический регулятор сильного действия [97].

Также рассматривается участие систем накопления энергии в регулировании частоты в сети. Цзяньвэй Ли, Цинцин Ян, Пэнфэй Яо, Цисинь Сунь, Чжэньюй Чжан, Минь Чжан, Вэйцзя Юань в [98] описывают возможность участия ветроустановок в первичном регулировании частоты в микросетях за счет использования систем накопления энергии на основе аккумуляторных батарей с функцией управления частотой. В статье [99] описывается положительное влияние систем накопления энергии на компенсацию колебаний ветра и, как следствие, генерируемой мощности ветроустановок. Цян Го, Цунчжи Хуан, Чживэй Сюэ, Юэ Инь, Вэйфэн Лян, Синьсинь Шэн представляют алгоритм работы ВЭС с системами накопления энергии (маховик + аккумуляторная батарея) [100]. Проанализированы нормальный и аварийный режим работы, а также участие всей системы в первичном регулировании частоты.

В специализированных источниках подробно представлены алгоритмы обеспечения виртуальной инерции. В статье [101] Г. Мартинес-Лукас, Х.И. Сарасуа, Ю.И. Перес-Диас, С. Мартинес, Д. Очоа анализируют управление частотой в энергосистеме за счет ветровых турбин с использованием виртуальной инерции и первичного регулирования частоты за счет работы ветроустановки в режиме разгрузки. Показывается, что исполь-

зование виртуальной инерции уменьшает падение частоты при отключении значительной генерации, а применение еще и первичного регулирования частоты улучшает эффект восстановления частоты. Исходя из того, что ветряная электростанция работает в режиме управления разгрузкой с получением запаса мощности, Цзычжао Ван, Линьюнь Ши, Фэнь, Янь Пэн, Байлян Лоу, Кван Ю. Ли [102] предлагается метод координированного управления, который сочетает в себе управление статизмом и управление виртуальной инерцией. При установке коэффициента статизма учитывается влияние запаса мощности ветряной электростанции на установку коэффициента статизма при двух различных условиях, при увеличении и уменьшении нагрузки соответственно. В статье [103] предлагается методология анализа влияния вклада ветровой генерации в задачи частотного управления на инерционные характеристики энергосистем. К этой проблеме подходят с аналитической точки зрения путем изучения передаточной функции, которая представляет динамику частоты системы в ответ на возмущения мощности на первичной стадии регулирования частоты.

При вычислении дифференциала частоты системы зачастую возникает проблема шумов и помех измерений, а также длительного отклика инерции. Вследствие этого использование алгоритмов виртуальной инерции может снизить стабильность частоты сети. В статье [104] представлено исследование зависимости коэффициента виртуальной инерции и различных входных параметров ветроустановки (скорость ветра и нагрузка). Единый виртуальный коэффициент инерции, выбранный на основе инженерного опыта, трудно применить в различных условиях, что может привести к плохому эффекту частотной модуляции и даже к нестабильности. Чтобы справиться с этой проблемой, предлагается управление виртуальной инерцией с использованием параметров адаптивной настройки с помощью нейронной сети. В примерах моделирования, состоящих из различных турбулентных изменений ветра и нагрузки, результаты показывают, что адаптивное управление виртуальной инерцией, разработанное в этой статье, показывает лучшую производительность, чем обычное управление с точки зрения эффекта частотной модуляции и стабильности.

В статье [105] исследовался вклад ВЭУ в

регулирование частоты сети. Проблема классического пропорционального виртуального инерциального управления с усилением шумов и помех решается применением следящего дифференциатора при участии в регулировании первичной частоты. Кроме того, этот документ также дает практическое руководство для взаимосвязанных энергосистем и вложенных мультимикросетей для решения проблемы стабильности частоты из-за высокого проникновения возобновляемых источников энергии. В отличие от традиционного УВИ на основе производной, предлагаемый метод не требует непосредственного вычисления дифференциала системной частоты. Это снижает усиление высокочастотных шумов измерений, улучшая качество регулирования. Следовательно, значительно улучшена инерционность сети без введения дополнительных нестабильных элементов. В данной работе М. Крпан, И. Кузле [106] представляют исследование чувствительности виртуального инерционного отклика к различным параметрам преобразователя. Этими параметрами являются: начальная рабочая точка, параметры контроллера преобразователя со стороны машины и со стороны линии, параметры управления углом наклона и параметры PLL. Адаптивное управление, предложенное в [107], уменьшает время отклика и уменьшает провал частоты.

Для обеспечения поддержки частоты некоторыми авторами предлагается комбинация УВИ и управления углом наклона лопастей. Чэн Чжун, Юэмин, Ян Чжоу, Хуаи Ли в [108] дается эквивалентная схема управления ветроустановкой 4 типа для поддержки частоты в изолированных микросетях. Определена новая эквивалентная переменная скорости вращения ротора, состоящая из комбинации управления углом наклона лопастей и скорости вращения ротора в зависимости от мощности нагрузки и скорости ветра. Ин Чжу, Шэн Лю, Вэй Ван [109] анализируют комплексный подход для поддержки частоты в сети ветровой турбиной на базе СГПМ, включая управление виртуальной инерцией с переменным коэффициентом, управление углом поворота лопастей и работу ВЭУ в режиме разгрузки.

Отдельный блок исследований посвящен применению суперконденсаторов в преобразователях для обеспечения с их помощью инерционного отклика [110]. Плюсом такого решения является возможность работы ВЭУ в

оптимальном режиме согласно кривой отслеживания максимальной мощности [111]. В статье [112] описываемая инерционная поддержка во время частотного события будет обеспечена конденсатором в звене постоянного тока. Процесс зарядки и разрядки энергии должен контролироваться, чтобы ВЭУ всегда была готова к поддержке частоты [113]. Основными недостатками этого метода являются размер конденсатора, который увеличивает размер тестируемой системы, и большое время отклика. В частности, для инерционной реакции эта энергия конденсатора в звене постоянного тока должна быть достаточно большой, чтобы обеспечить временную инерционную реакцию в течение короткого интервала времени. Статья [114] посвящена моделированию схемы процесса заряда суперконденсатора после его работы по обеспечению виртуальной инерции и последующему подержанию этого заряда на уровне, необходимом для наиболее эффективной дальнейшей работы.

Но в большинстве случаев для того чтобы избежать вторичной просадки частоты, необходимы дополнительные средства для обеспечения первичного и вторичного регулирования частоты. Для этого могут использоваться системы накопления энергии как нетрадиционные (например, водородные топливные элементы [115]), так и классические аккумуляторные батареи [116]. Зачастую такие системы гибридные – аккумуляторная батарея используется совместно с суперконденсатором [117–120]. Батарея используется для компенсации низкочастотных колебаний мощности (первичное регулирование частоты), а суперконденсатор применяется для компенсации высокочастотных колебаний мощности (формирует виртуальную инерцию ВЭУ) [121]. Важен правильный расчет емкости батарей с учетом возможности обеспечения поддержки частоты [122]. Минмин Ши, Хунфэй Чэнь, Чэньюй Чжан, Фэй Мэй, Цзичэн Фан, Мяо Хуэйюй в своей статье [123] предлагают стратегию управления с обратной связью о состоянии заряда батареи, что позволит избежать перезаряда и глубокого разряда. Способ может в определенной степени обеспечить исправную работу батареи при резких колебаниях мощности, а также обеспечивает более долгий срок службы батарей. Базовая схема управления инерцией может быть не очень точной при больших частотных возмущениях из-за переменного коэффициента виртуальной инерции. В качестве решения

может быть реализована нелинейная схема управления инерцией, которая обеспечивает постоянный коэффициент инерции и достаточную эмуляцию инерции даже при больших частотных возмущениях [124].

Концепция использования суперконденсаторов, или гибридных систем накопления энергии, может применяться не только для ветроустановок, но и солнечных электростанций [125] или микросети, содержащей ВЭС, СЭС, дизельную генерацию и нагрузку [126]. Как было сказано ранее, в микросетях большую роль в их устойчивости может сыграть наличие аккумуляторных батарей (АКБ). При этом АКБ могут быть как индивидуального исполнения для каждой установки, так и централизованными [127].

При исследовании суперконденсаторов как средств поддержки частоты важно понимать, что в моделировании зачастую представляется идеальный вариант суперконденсатора, когда энергия, необходимая для реализации виртуальной инерции, меньше, чем накоплена в нем. Однако поскольку разные модели с разными значениями емкости будут разряжаться с разной скоростью, идеальное представление может неадекватно отражать реалистичное поведение, если требуемая энергия больше, чем энергия, хранящаяся в системе суперконденсатора. Это может привести к ошибочному выводу об ожидаемой частотной характеристике [128].

Методы обеспечения виртуальной инерции с помощью конденсатора и кинетической инерции вращающихся частей могут быть использованы совместно. Авторами статьи [129] предлагается стратегия, которая использует зону нечувствительности по частоте для координации приоритета регулирования частоты для двух различных методов (суперконденсатор и ВИ).

Суть этого метода заключается в обеспечении быстрой поддержки частоты за счет использования сначала энергии суперконденсатора, а затем кинетической энергии вращения ротора (виртуальная инерция), что может минимизировать потери энергии ветра при обеспечении желаемой поддержки частоты. Результаты моделирования показывают, что при условии аналогичного эффекта управления предложенный метод может обеспечить снижение потерь энергии на 75,0% и улучшение показателей регулирования частоты по сравнению с традиционным управлением. Кроме того, предлагаемый метод

также может эффективно предотвращать колебания мощности.

Таким образом, исследования в этой области показывают, что участие ветроустановок в поддержании частоты в энергосистеме является реально решаемой задачей. Каждое средство регулирования имеет свои плюсы и минусы. АКБ хорошо демпфируют колебания мощности (они стандартные), позволяют эффективнее использовать ресурсы, запасая электроэнергию при снижении потребления в сети. Однако обеспечение существенной емкости аккумуляторных батарей является очень дорогим решением. Гораздо дешевле по капиталовложениям ограничить мощность ветроустановки для использования данного запаса при возникновении частотного события, однако в этом случае снижается полезная выработка электроэнергии в нормальном режиме, что увеличивает срок окупаемости вложений.

Решение проблемы с низкой инерцией ВИЭ тоже может быть выполнено разными способами, имеющими достоинства и недостатки. Применение суперконденсаторов – это просто и относительно дешево, однако требуются дополнительные расчеты емкости, строгие алгоритмы подзаряда/разряда и поддержание необходимого уровня заряда. Неправильная настройка виртуальной инерции за счет кинетической энергии ротора ветроустановки может привести к сильному снижению частоты его вращения и аварийному останову.

Поэтому каждый способ должен применяться исходя из реальных условий работы ветропарков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие технологий, позволяющих повысить регулировочные способности ветроэлектрической станции, является актуальной задачей, так как низкая инерция источников возобновляемой энергии приводит к снижению устойчивости энергосистем, в составе которых значительная доля – ветроэлектрические станции. Эта и другие проблемы с возобновляемыми источниками энергии связаны в первую очередь со случайнопериодическим характером генерации электроэнергии. Именно данное обстоятельство заставляет использовать силовые преобразователи для подключения их к сети, а они, в свою очередь, не обеспечивают инерционную связь вращающихся частей ветроустановок с

сеть, как это происходит в случае традиционных источников энергии.

Для решения проблем со стохастической природой генерации ВИЭ их стоит объединять в микросеть вместе с потребителями для изолированных от энергосистемы районов или в виртуальную электростанцию для ее последующей интеграции в общую энергосистему.

Одним из решений повышения устойчивости энергосистем с высокой долей ветроэлектрических установок в составе является создание виртуальной инерции ВЭУ. Однако ввиду ограниченной мощности и возможностей регулирования каждого отдельного ветрогенератора эффективность внедрения виртуальной инерции может быть недостаточной при ее независимой реализации на отдельных установках.

По результатам анализа специализированной литературы можно сделать вывод, что реализация независимого управления виртуальной инерцией на каждой ВЭУ требует проведения анализа переходных процессов всей сети на этапе проектирования. Несогласованная работа алгоритма виртуальной инерции ветропарка может привести к перерегулированию так, что суммарное изменение мощности ветропарка приведет также к нарушению устойчивости уже от действия виртуальной инерции. При этом добавление энергоустановки в ветропарк потребует проведения повторных расчетов устойчивости и перенастройки коэффициентов регулирования виртуальной инерции на уже работающих ВЭУ. Кроме того, оперативное изменение конфигурации (состава ВЭУ) и режимов работы также скажется на эффективности независимого управления ВИ.

Для обеспечения адаптивности управления парком ВЭУ можно организовать иерархическую систему, верхним узлом которой будет вычислительная система, моделирующая динамику энергосистемы с детально представленными в ней ВЭУ. На данной модели будут анализироваться устойчивость энергосистемы на нормативные возмущения и автоматически подбираться коэффициенты регулятора, определяющие работу виртуальной инерции каждого генератора. Пересчет коэффициентов ВИ необходимо делать при изменении конфигурации сети, а также при существенном изменении режима работы ВЭУ. Таким образом, требуется передача достаточно большого

объема информации, организация каналов связи, а самое главное – реализация адекватной системы моделирования, работающей в темпе процесса. Данный подход видится неоправданно дорогостоящим.

Другим возможным вариантом может быть подход, когда при анализе устойчивости системы модели отдельных ВЭУ будут заменены на обобщенную модель, представляющую весь ветропарк. Действительно, такой подход возможен, если принять то, что постоянные инерции отдельных агрегатов близки и в модели обобщенной ВЭУ может быть использована усредненная постоянная инерция. Реализация автоматического расчета обобщенных коэффициентов в этом случае значительно упрощается. При этом отпадает необходимость сбора данных с ВЭУ. Достаточно знать суммарную мощность ветропарка, получаемую по балансу на уровне электрической сети, и средние погодные условия в энергорайоне для моделирования аэродинамической части.

Таким образом, имея рассчитанные на основе анализа нормативных возмущений требуемые для обеспечения устойчивости границы для обобщенной модели ветропарка, можно применить мультиагентную систему адаптации виртуальной инерции отдельных ВЭУ, работающую по кооперативному принципу. Данная модель, работая в доаварийном режиме, распределяет суммарные коэффициенты ВИ.

Предложенный мультиагентный подход не требует организации сложных каналов связи. Для передачи данных может использоваться любая среда, в том числе локальные системы связи, когда отдельный агент обменивается информацией только со своими непосредственными соседями. Вычислительная система, рассчитывающая режим сети, также выступает в виде агента, рассчитывающего общие ограничения по устойчивости для всего ветропарка. Информация об ограничении при этом небольшая по объему и может передаваться при каждом сеансе передачи информации между агентами в сети.

Для проверки данных тезисов необходимо провести исследования алгоритмов и способы управления виртуальной инерцией ветроэлектрической станцией с использованием мультиагентного подхода, провести анализ результатов предложенного алгоритма, позволяющего формировать участие в регулировании режимов электроэнергетической сети и повышать запас динамической устойчивости.

Список источников

1. Xu Xiwang, Sun Lu, An Ning, Li Fang, Su Lining, Qin Xiaohui. Simulation research of wind turbine frequency modulation based on different wind power penetration levels // 8th Renewable Power Generation Conference. 2019. P. 0435. <https://doi.org/10.1049/cp.2019.0435>.
2. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. 3-е изд., доп. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016. 421 с.
3. Lombardi P., Sokolnikova T., Suslov K., Voropai N., Styczynski Z.A. Isolated power system in Russia: a chance for renewable energies? // Renewable Energy. 2016. Vol. 90. 532–541. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.016>.
4. Воропай Н.И., Губко М.В., Ковалев С.П., Массель Л.В., Новиков Д.А., Райков А.Н. [и др.]. Проблемы развития цифровой энергетики в России // Проблемы управления. 2019. № 1. С. 2–14. <https://doi.org/10.25728/ru.2019.1.1>.
5. Сабинин Г.Х. Теория и аэродинамический расчет ветряных двигателей // Труды ЦАГИ. 1931. №. 104. С. 59–60.
6. Фатеев Е.М. Методика определения параметров ветроэнергетических расчетов ветросиловых установок. М.: Акад. наук СССР, 1957. 87 с.
7. Безруких П.П. Эффективность возобновляемой энергетики. Мифы и факты // Технологии, средства механизации и энергетическое оборудование. 2016. № 6. С. 11–24. EDN: WDLFHB.
8. Лятхер В.М. Развитие ветроэнергетики // Малая энергетика. 2006. № 1-2. С. 23–38. EDN: JVJUWX.
9. Грибков С.В., Юдаев И.В., Ракитов С.А. Многомодульные ветроэнергетические установки в системах гарантированного электроснабжения // Техника в сельском хозяйстве. 2012. № 2. С. 26–29. EDN: XTRIPZ.
10. Martínez J.C., Gómez S.A., Rodríguez Amenedo J.L.R. Alonso-Martínez J. Analysis of the frequency response of wind turbines with virtual inertia control // IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (Madrid, 9–12 June 2020). Madrid: IEEE, 2020. P. 9160718. <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160718>.
11. Кирпичникова И.М., Мартыанов А.С., Соломин Е.В. Преобразование энергии в ветроэнергетических установках // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2010. №. 1. С. 93–97.
12. He Ping, Wen Fushuan, Ledwich Gerard, Xue Yusheng. Investigation of the effects of various types of wind turbine generators on power-system stability // Journal of Energy Engineering. 2015. Vol. 141. Iss. 3. P. 04014007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000176](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000176).
13. Удалов С.Н., Манусов В.З. Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики: монография. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013. 200 с.
14. Dermentzoglou J.C., Karlis A.D. Development of linear models of static var compensators and design of controllers suitable for enhancing dynamic/transient performance of power systems including wind farms // Electric power systems research. 2011. Vol. 81. Iss. 4. P. 922–929. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.11.021>.
15. McSwiggan D., Littler T. Analysis of fixed-speed wind farm low-frequency power pulsations using a wavelet-prony method // IEEE PES General Meeting. 2010. <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5590058>.
16. Ekwue A., Nanka-Bruce O., Rao Jhansi, McCool D. Dynamic stability investigations of the fault ride through capabilities of a wind farm // Paper ID. 2008. T. 99.
17. Saidi A.S., Chokri B. Effect of static and dynamic load model on dynamic stability of distribution network with fixed and variable speed wind farm: a bifurcation analysis // International Review on Modelling and Simulations. 2012. Vol. 5. Iss. 4. С. 1690–1699.
18. Morren J., De Haan S.W.H. Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2005. Vol. 20. Iss. 2. P. 435–441. <https://doi.org/10.1109/TEC.2005.845526>.
19. Bialas H., Pawelek R., Wasiak I. A Simulation model for providing analysis of wind farms frequency and voltage regulation services in an electrical power system // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 8. P. 2250. <https://doi.org/10.3390/en14082250>.
20. Wang Yi, Meng Jianhui, Zhang Xiangyu, Xu Lie. Control of PMSG-based wind turbines for system inertial response and power oscillation damping // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2015. Vol. 6. Iss. 2. С. 565–574. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2394363>.
21. Li Wendan, Liu Yutian. SVG supplementary damping control for the dynamic stability of wind farm // China International Conference on Electricity Distribution. 2014. P. 340–343. <https://doi.org/10.1109/CICED.2014.6991724>.
22. Wu Ziping, Gao Wenzhong, Yang Daye, Shi Yan. Comprehensive modeling and analysis of permanent magnet synchronous generator-wind turbine system with enhanced low voltage ride through capability // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (Raleigh, NC, 15–20 September). Raleigh, NC: IEEE, 2012. P. 2091–2098. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342554>.
23. Han Bing, Wang Yi, Li Heming, Zhang Xiangyu. Supplementary power control of PMSG-based wind farms for system dynamic stability // International Conference on Electrical Machines and Systems (Busan, 26–29 October 2013). Busan: IEEE, 2013. P. 291–295. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2013.6754469>.
24. Nagarajan S.T., Kumar N. Active power variation in wind farms by varying the number of wind turbine units // International Journal of Sustainable Energy. 2013. Vol. 32. Iss. 6. P. 735–749. <https://doi.org/10.1080/14786451.2013.824876>.
25. Sun Jun, Sheng Lijian, Sun Yong, Zhou Zhenkai, Fu Rong. Stability simulation analysis of a hybrid wind-battery system // Communications in Computer and Information Science / eds. L. Zhang, X. Song, Y. Wu. Singapore: Springer, 2016. Vol. 645.

P. 154–163. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2669-0_17.

26. Son Dae-Hee, Ali M., Kang Sang-Hee, Heo Jae-Haeng, Nam Soon-Ryul. A method for increasing the operating limit capacity of wind farms using battery energy storage systems with rate of change of frequency // *Energies*. 2018. Vol. 11. Iss. 4. P. 758. <https://doi.org/10.3390/en11040758>.

27. Shazon Md.N.H., Masood N., Ahmed H.M., Deeba S.R., Hossain E. Exploring the utilization of energy storage systems for frequency response adequacy of a low inertia power grid // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 129933–129950. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3114216>.

28. Карамов Д.Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения использующей возобновляемые источники энергии // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. Т. 9. С. 133–140.

29. Карамов Д.Н. Структурная оптимизация автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии // *Сборник трудов молодых ученых к 55-летию Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН*. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. Вып. 45. С. 84–89.

30. Попель О.С. Автономные энергоустановки на возобновляемых источниках энергии // *Энергосбережение*. 2006. № 3. С. 21–30.

31. Удалов С.Н., Ачитаев А.А. Автоматическое управление ветровыми установками с магнитной редуцией скорости вращения генератора и турбины: монография. Саяногорск: Саяно-Шушенский филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», 2021. 220 с. EDN: WCRGMM.

32. Udalov S.N., Achitaev A.A., Pristup A.G., Bochenkov B.M., Pankratz Yu., Tarbill R.D. Increasing the regulating ability of a wind turbine in a local power system using magnetic continuous variable transmission // *Wind Engineering*. 2018. Vol. 42. Iss. 5. P. 411–435. <https://doi.org/10.1177/0309524X18780404>.

33. Удалов С.Н., Ачитаев А.А., Приступ А.Г., Боченков Б.М. Повышение запаса динамической устойчивости автономной энергетической системы на базе ветроэнергетических установок при резких изменениях режима нагрузки // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2016. Т. 327. № 8. С. 89–98.

34. Удалов С.Н., Приступ А.Г., Ачитаев А.А. Исследование магнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением в ветроэнергетической установке в целях повышения запаса динамической устойчивости // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2015. Т. 326. № 10. С. 123–134.

35. Vithanage V. A review on multi-agent system based energy management systems for micro grids // *AIMS Energy*. 2019. Vol. 7. Iss. 6. P. 924–943.

36. Zhong Weilin, Murad M.A.A., Liu Muyang, Milano F. Impact of virtual power plants on power system short-term transient response // *Electric Power Systems Research*. 2020. Vol. 189. P. 106609. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106609>.

37. Исмоилов С.Т., Труфакин С.С., Фишов А.Г. Мультиагентное регулирование напряжения в электрических сетях с распределенной генерацией и активными потребителями // *Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: труды 4-й Междунар. науч.-практ. конф. (г. Екатеринбург, 3–7 июня 2013 г.)*. Екатеринбург: Российский нац. комитет СИГРЭ. 2013. С. 99–100.

38. McArthur S., Davidson E.M., Catterson V.M., Dimeas A., Hatziargyriou N.D., Ponci F, et al. Multi-agent systems for power engineering applications - part 2: technologies, standards and tools for building multi-agent systems // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2007. Vol. 22. Iss. 4. P. 1743–1752. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.908471>.

39. Saleem A., Lind M., Veloso M.M. Multiagent based protection and control in decentralized electric power systems // *9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems AAMAS*. 2010. P. 83–89.

40. Solanki J., Khushalani Solanki S., Schulz N. Multi-agent-based reconfiguration for restoration of distribution systems with distributed generators // *Integrated Computer-Aided Engineering*. 2010. Vol. 17. Iss. 4. P. 331–346. <https://doi.org/10.3233/ICA-2010-0351>.

41. Solanki J., Khushalani Solanki S., Schulz N. A multi-agent solution to distribution systems restoration // *IEEE transactions on Power Systems*. 2007. Vol. 22. Iss. 3. P. 1026–1034. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.901280>.

42. Kumar A., Tiwari L., Somwanshi D. Design architecture and optimization of multi agent based smart grid // *IEEMA Engineer Infinite Conference*. 2018. <https://doi.org/10.1109/ETECHNXT.2018.8385289>.

43. Ju Liwei, Zhang Qi, Tan Zhongfu, Wang Wei, Xin He, Zhang Zehao. Multi-agent-system-based coupling control optimization model for micro-grid group intelligent scheduling considering autonomy-cooperative operation strategy // *Energy*. 2018. Vol. 157. Iss. 2. p. 1035–1052. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.097>.

44. Divényi D., Dán A.M. Agent-based modeling of distributed generation in power system control // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2013. Vol. 4. Iss. 4. P. 886–893. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2013.2253811>.

45. Gao Yang, Ai Qian. Distributed multi-agent control for combined AC/DC grids with wind power plant clusters // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2018. Vol. 12. Iss. 3. P. 670–677. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0689>.

46. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. A multi-agent control system of distributed generation plants // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076128>.

47. Vorobev P, Huang Po-Hsu, Hosani M., Kirtley J.L., Turitsyn K. High-fidelity model order reduction for microgrids stability assessment // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2017. Vol. 33. Iss. 1. C. 874–887. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2707400>.

48. Chen Min-Rong, Zeng Guo-Qiang, Dai Yu-Xing, Lu Kang-Di. Fractional-order model predictive frequency control of an

- islanded microgrid // *Energies*. 2018. Vol. 12. Iss. 1. P. 84. <https://doi.org/10.3390/en12010084>.
49. Sahoo A.K., Abhitharan K.P., Kalaivani A., Karthik T.J. Feasibility study of microgrid installation in an educational institution with grid uncertainty // 4th International Conference on Eco-friendly Computing and Communication Systems. 2015. Vol. 70. P. 550–557. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.10.099>.
50. Boemer J.C., Gibescu M., Kling W.L. Dynamic models for transient stability analysis of transmission and distribution systems with distributed generation: an overview // *IEEE Bucharest PowerTech*. 2009. <https://doi.org/10.1109/PTC.2009.5282177>.
51. Derrouazin A., Mekkakia-Maaza N., Taleb R., Nacef M., Aillerie M. Low cost hybrid energiless smart management system applied for micro-grids // *Energy Procedia*. 2014. Vol. 50. P. 729–737.
52. Yakine K.E.N., Mena M., Hasni M., Boudour M. A novel optimal frequency control strategy for an isolated wind-diesel hybrid system with energy storage devices // *Wind Engineering*. 2016. Vol. 40. Iss. 6. P. 497–517. <https://doi.org/10.1177/0309524X16671091>.
53. Muljadi E., McKenna H.E. Power quality issues in a hybrid power system // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2001. Vol. 2. Iss. 3. P. 803–809. <https://doi.org/10.1109/TIA.2002.1003433>.
54. Zhang Yang, Lundblad A., Campana P.E. Benavente F., Yan Jinyue. Battery sizing and rule-based operation of grid-connected photovoltaic-battery system: a case study in Sweden // *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 133. P. 249–263.
55. Muljadi E., Butterfield C. Yinger R., Romanowitz H. Energy storage and reactive power compensator in a large wind farm // *AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. 2004. C. 114–123. <https://doi.org/10.2514/6.2004-352>.
56. Vernet A., Khayesi J.N., George V., George G., Bahaj A.S. How does energy matter? Rural electrification, entrepreneurship, and community development in Kenya // *Energy Policy*. 2019. Vol. 126. P. 88–98.
57. Arulampalam A., Barnes M., Engler A., et al. Control of power electronic interfaces in distributed generation microgrids // *International Journal of Electronics*. 2004. Vol. 91. Iss. 9. P. 503–523. <https://doi.org/10.1080/00207210412331289023>.
58. Katiraei F., Iravani M.R., Lehn P.W. Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 20. Iss. 1. P. 248–257. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.835051>.
59. Van Ackooij W., De Boeck J., Detienne B., Pan S., Poss M. Optimizing power generation in the presence of micro-grids // *European Journal of Operational Research*. 2018. Vol. 271. Iss. 2. P. 450–461. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.05.042>.
60. Lin Haiyang, Wang Qinxing, Wang Yu, Yiling Liu, Huang Nianzhi, Wennersten R., et al. A multi-agent based optimization architecture for energy hub operation // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 142. P. 2158–2164. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.621>.
61. Ormandjieva O., Bentahar J., Huang Jinzi, Kuang Heng. Modelling multi-agent systems with category theory // *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 52. Iss. 1. P. 538–545. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.031>.
62. González-Pardo A, Varona P, Camacho D, et al. Communication by identity discrimination in bio-inspired multi-agent systems // *Concurrency and Computation Practice and Experience*. 2012. Vol. 24. Iss. 6. P. 589–603. <https://doi.org/10.1002/cpe.1866>.
63. Mehta R., Radhakrishnan B. M., Srinivasan D., Panda S.K., Rathore A.K. Market based multi-agent control of microgrid // *IEEE Ninth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*. 2014. <https://doi.org/10.1109/ISSNIP.2014.6827704>.
64. Colson C.M., Nehrir M.H. A review of challenges to real-time power management of microgrids // *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2009. <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275343>.
65. Guo Ge, Ding Lei, Han Qing-Long. A distributed event-triggered transmission strategy for sampled-data consensus of multi-agent systems // *Automatica*. 2014. Vol. 50. Iss. 5. P. 1489–1496. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.03.017>.
66. Li Hongjie, Ming Chen, Shen Shigen, Wong W.K. Event-triggered control for multi-agent systems with randomly occurring nonlinear dynamics and time-varying delay // *Journal of the Franklin Institute*. 2014. Vol. 351. Iss. 5. P. 2582–2599.
67. Wang Lingfeng, Wang Zhu, Yang Rui. Intelligent multiagent control system for energy and comfort management in smart and sustainable buildings // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012. Vol. 3. Iss. 2. P. 605–617. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2178044>.
68. Funabashi T., Fujita G., Koyanagi K., Yokoyama R. Field tests of a microgrid control system // *Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference*. 2006. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2006.367750>.
69. Yousef H., Al-Badi A.H., Polycarpou A. Power management for hybrid distributed generation systems // *International Journal of Sustainable Engineering*. 2009. Vol. 11. Iss. 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.1080/19397038.2017.1387825>.
70. Kim Hak-Man, Kinoshita T. Multiagent system for Microgrid operation based on power market environment // 31st International Telecommunications Energy Conference. 2009. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2009.5351771>.
71. Yuqin Xu, Li Zhang, Zengping Wang. Research on service restoration for large area blackout of distribution system with distributed generators // *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*. 2009. <https://doi.org/10.1109/SUPERGEN.2009.5347908>.
72. Li X.D., Xu Y.Q., Zhang L. Distribution service restoration with DGs based on multi-agent immune algorithm // 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System. 2009. <https://doi.org/10.1109/PEITS.2009.5407060>.
73. Yavuz L., Onen A., Muyeen S., Innocent K. Transformation of Microgrid to Virtual Power Plant – A Comprehensive Review // *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2019. Vol. 13. Iss. 11. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.5649>.

74. Chen Junru, Liu Muyang, Milano F. Aggregated model of virtual power plants for frequency and voltage stability analysis // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2021. Vol. 36. Iss. 5. P. 4366–4375. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3063280>.
75. Marecek J., Roubalik M., Ghosh R., Shorten R.N., Wirth F.R. Predictability and fairness in load aggregation and operations of virtual power plants // *Automatica*. 2023. Vol. 147. P. 110743. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.03001>.
76. Moutis P., Georgilakis P.S., Hatzigiorgiou N.D. Voltage regulation support along a distribution line by a virtual power plant based on a center of mass load modeling // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018. Vol. 9. Iss. 4. P. 3029–3038.
77. Zhong Weilin, Chen Junru, Liu Muyang, Murad M.A.A., Milano F. Coordinated control of virtual power plants to improve power system short-term dynamics // *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 4. P. 1182. <https://doi.org/10.3390/en14041182>.
78. Xin Huanhai, Gan Deqiang, Li Naihu, Li Huijie, Dai Chensong. Virtual power plant-based distributed control strategy for multiple distributed generators // *IET Control Theory & Applications*. 2013. Vol. 7. Iss. 1. P. 90–98. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2012.0141>.
79. Häberle V., Fisher M.W., Araujo E.P., Dorfler F. control design of dynamic virtual power plants: an adaptive divide-and-conquer approach // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2021. Vol. 37. Iss. 5. 4040–4053. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3139775>.
80. Björk J., Johansson K.H., Dorfler F. Dynamic virtual power plant design for fast frequency reserves: coordinating hydro and wind // *IEEE Transactions on Control of Network Systems*. 2022. Vol. 10. Iss. 3. P. 1266–1278. <https://doi.org/10.1109/TCNS.2022.3181553>.
81. Tan Zhenfei, Zhong Haiwang, Xia Qing, Kang Chongqing, Wang Xuanyuan Sharon, Tang Honghai. Estimating the robust P-Q capability of a technical virtual power plant under uncertainties // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020. Vol. 35. Iss. 6. P. 4285–4296. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.2988069>.
82. Ahangar R.A., Sheykholeslam A. Bulk virtual power plant, a novel concept for improving frequency control and stability in presence of large scale RES // *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*. 2014. Vol. 4. Iss. 10. P. 1017–1044.
83. Zhong Weilin, Tzounas G., Liu Muyang, Milano F. On-line inertia estimation of virtual power plants // *22nd Power Systems Computation Conference*. 2022. Vol. 212. Iss. 2. P. 108336 <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108336>.
84. Li Pengfei, Hu Weihao, Hu Rui, Huang Qi, Yao Jun, Chen Zhe. Strategy for wind power plant contribution to frequency control under variable wind speed // *Renewable Energy*. 2019. Vol. 130. P. 1226–1236. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.046>.
85. Melhem B.M., Zhou Yakun, Liu Steven. Frequency support and stability analysis for an integrated power system with wind farms // *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2018. <https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8592707>.
86. Boyle J., Littler T., Muyeen S.M., Foley A.M. An alternative frequency-droop scheme for wind turbines that provide primary frequency regulation via rotor speed control // *Electrical Power and Energy Systems*. 2021. Vol. 133. Iss. 1. P. 107219. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107219>.
87. Gomez L.A.G., Lourenço L.F.N., Salles M.B.C., Grilo A.P., Sguarez A.J. Frequency support of grid connected wind turbine based-DFIG // *International Conference on Clean Electrical Power*. 2019. <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2019.8890110>.
88. Nadour M., Essadki A., Nasser T. Coordinated control using backstepping of DFIG-based wind turbine for frequency regulation in high wind energy penetrated system // *Hindawi, Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 3. P. 8287949. <https://doi.org/10.1155/2020/8287949>.
89. Lyu Xue, Jia Youwei, Dong Zhaoyang. Adaptive frequency responsive control for wind farm considering wake interaction // *Journal of modern power systems and clean energy*. 2021. Vol. 9. Iss. 5. P. 1066–1075. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2020.000237>.
90. Singh N., De Kooning J.D.M., Vandeveld L. Dynamic wake analysis of a wind turbine providing frequency support services // *IET Renewable Power Generation*. 2022. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12455>.
91. Xi Jiangbei, Geng Hua, He Xiuqiang. Adaptive VSG control scheme for large scale wind farms to improve frequency response characteristics // *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. 2019. <https://doi.org/10.1109/IAS.2019.8912376>.
92. Abazari A., Monsef H., Wu Bin. Load frequency control by de-loaded wind farm using the optimal fuzzy-based PID droop controller // *IET Renewable Power Generation*. 2019. Vol. 13. Iss. 1. P. 180–190. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5392>.
93. Becker H., Valois-Rodriguez M.F., Holicki L., Malekian K., Gartmann P. Evaluation of wind power plants' control capabilities to provide primary frequency support during system restoration // *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies*. 2021. <https://doi.org/10.1109/SEST50973.2021.9543369>.
94. Junkai Huang, Zhifang Yang, Juan Yu, Juelin Liu, Ning Guo. Parameter design of DFIG-based controller for frequency stability improvement // *5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering*. 2020. <https://doi.org/10.1109/ACPEE48638.2020.9136320>.
95. Morovati S., Pulgar H. Control coordination between DFIG-based wind turbines and synchronous generators for optimal primary frequency response // *52nd North American Power Symposium*. 2020.
96. Zhang Liusheng, Xie Zhen, Chang Yuyang, Zhu Hong. Virtual inertia adaptive control strategy for DFIG wind turbines based on exponential function // *15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (Kristiansand, 9–13 November)*. Kristiansand: IEEE, 2020. P. 407–411. <https://doi.org/10.1109/ICIEA48937.2020.9248341>.
97. Yakout A.H., Kotb H., Sabry W. Power system stability improvement by employing strong action controller acting as virtual

inertia controller // 22nd International Middle East Power Systems Conference. 2021. P. 562–568. <https://doi.org/10.1109/MEPCON50283.2021.9686209>.

98. Li Jianwei, Yang Qingqing, Yao Pengfei, Sun Qixing, Zhang Zhenyu, Zhang Min, et al. A novel use of the hybrid energy storage system for primary frequency control in a microgrid // *Energy Procedia*. 2016. Vol. 103. P. 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.253>.

99. Chen Xiaobin, Liu Hui, Su Jinshuo, Qin Risheng. The control strategy of energy storage system for primary frequency regulation and wind power ramp control // 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering. 2020. P. 652–656. <https://doi.org/10.1109/ACPEE48638.2020.9136416>.

100. Guo Qiang, Huang Congzhi, Xue Zhiwei, Yin Yue, Liang Weifeng, Sheng Xinxin. Research on energy storage system participation in primary frequency regulation of large-scale wind turbines // 1st International Conference on Industrial Artificial Intelligence. 2019. <https://doi.org/10.1109/ICIAI.2019.8850837>.

101. Martínez-Lucas G., Sarasúa J.I., Pérez-Díaz Ju.I., Martínez S., Ochoa D. Analysis of the implementation of the primary and/or inertial frequency control in variable speed wind turbines in an isolated power system with high renewable penetration // *Case Study: El Hierro Power System. Electronics*. 2020. Vol. 9. Iss. 6. P. 901. <https://doi.org/10.3390/electronics9060901>.

102. Wang Zizhao, Shi Linjun, Feng, Peng Yan, Lou Bailliang, Lee Kwang Y. Coordinated droop and virtual inertia control of wind farm for frequency regulation // IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2020. <https://doi.org/10.1109/PESGM41954.2020.9281722>.

103. Ochoa-Correa D., Martinez S. Analytical approach to understanding the effects of implementing fast-frequency response by wind turbines on the short-term operation of power systems // *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 12. P. 3660. <https://doi.org/10.3390/en14123660>.

104. Zhang Tianhai, Shu Jianjun, Wang Jingbo, Tang Keyi, Liu Nana. Adaptive virtual inertial control of wind turbine generators considering wind speed and load variation // 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2020. <https://doi.org/10.1109/appeec48164.2020.9220484>.

105. Xiao Qi, Madonski R., Congzhi Huang, Yiming Ke. Tracking-differentiator-based dynamic virtual inertial control of offshore wind power plant for frequency regulation // *Electrical Power and Energy Systems*. 2022. Vol. 141. Iss. 106767. P. 108150. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108150>.

106. Krpan M., Kuzle I. Dynamic characteristics of virtual inertial response provision by DFIG-based wind turbines // *Electric Power Systems Research*. 2020. Vol. 178. P. 106005. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106005>.

107. Bastiani B.A., De Oliveira R.V. Adaptive MPPT control applied to virtual synchronous generator to extend the inertial response of type-4 wind turbine generators // *Sustainable Energy Grids and Networks*. 2021. Vol. 27. P. 100504. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100504>.

108. Zhong Cheng, Lv Yueming, Zhou Yang, Li Huayi. An equivalent rotor speed compensation control of PMSG-based wind turbines for frequency support in islanded microgrids // *Frontiers in Energy Research*. 2021. Vol. 9. P. 717327. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.717327>.

109. Zhu Ying, Liu Sheng, Wang Wei. Comprehensive coordinated control strategy of PMSG-based wind turbine for system inertia support // *IET Renewable Power Generation*. 2021. Vol. 15. P. 1915–1926. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12115>.

110. Yang Li, Hu Zhijian, Xie Shiwei, Kong Shunfei, Lin Weiwei. Adjustable virtual inertia control of supercapacitors in PV-based AC microgrid cluster // *Electric Power Systems Research*. 2019. Vol. 173. Iss. 3053. P. 71–85. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.04.011>.

111. Zeng Xueyang, Li Xiaopeng, Wang Shunliang, Liu Tianqi, Zhang Chun, Zhang Huajie. Virtual inertia control and short-term primary control for PMSG-based wind turbine using supercapacitor // 4th International Conference on HVDC. 2020. P. 191–196. <https://doi.org/10.1109/HVDC50696.2020.9292799>.

112. Hasan N.S., Rosmin N., Nordin N.M., Hassan M.Yu. Virtual inertial support extraction using a super-capacitor for a wind-PMSG application // *IET Renewable Power Generation*. 2019. Vol. 13. Iss. 10. P. 1802–1808. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5655>.

113. Hasan N.S., Rosmin N., Nordin N.J.M., Mustaamal A.H., Husin S.M., Aripriharta A., et al. Virtual inertia support for wind turbine system // *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2020. Vol. 17. Iss. 2. P. 629–636. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v17.i2.pp629-636>.

114. Mauricio J.M., Malamaki K.-N., Maza-Ortegaet J.M., Kryonidis G., Barragan-Villarejoal M., Gkavanoudis S.I. Short-term energy recovery control for virtual inertia provision by renewable energy sources // IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics. 2021. <https://doi.org/10.1109/ISIE45552.2021.9576213>.

115. Zhu Yuyan, Wang Huaiyuan, Zhu Zhenshan. Improved VSG control strategy based on the combined power generation system with hydrogen fuel cells and super capacitors // *Energy Reports*. 2021. Vol. 7. P. 6820–6832. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.10.056>.

116. Fregelius M., Lundin U. Hardware implementation of a synthetic inertia system for grid stability // 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications. 2019. P. 186–190. <https://doi.org/10.1109/ICRERA47325.2019.8997097>.

117. Huiyu Miao, Chenyu Zhang, Mei Fei, Yun Yang, Jianyong Zheng. A novel control strategy for hybrid energy system in virtual synchronous generator // 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2018. P. 2244–2249. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2018.8398083>.

118. Shadabi H., Kamwa I. Enabling hybrid energy storage systems in VSC-based MTDC grids for decentralized fast

- frequency response control in low-inertia AC/DC systems // IET Generation, Transmission and Distribution. 2021. Vol. 16. P. 897–911. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12335>.
119. Jithin T., Rajeev T., Jithin S. Inertia control of hybrid AC/DC microgrid using supercapacitors // Second International Conference on Power, Control and Computing Technologies. 2022. <https://doi.org/10.1109/ICPC2T53885.2022.9776860>.
120. Fang Jingyang, Tang Yi, Li Hongchang, Blaabjerg F. The role of power electronics in future low inertia power systems // IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition. 2018. <https://doi.org/10.1109/PEAC.2018.8590632>.
121. Fang Jingyang, Tang Yi, Li Hongchang, Li Xiaoqiang. A battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for implementing the power management of virtual synchronous generators // IEEE Transactions on Power Electronics. 2018. Vol. 33. Iss. 4. P. 2820–2824. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2759256>.
122. Chen Liang, Blaabjerg Frede. Virtual synchronous generator based on type-IV wind turbine with supercapacitor as storage // IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (Chengdu, 18–21 July 2021). Chengdu: IEEE, 2021. P. 1194–1200. <https://doi.org/10.1109/ICPSAsia52756.2021.9621445>.
123. Shi Mingming, Chen Hongfei, Zhang Chenyu, Mei Fei, Fang Jicheng, Huiyu Miao. A virtual synchronous generator system control method with battery SOC feedback // 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration. 2018. <https://doi.org/10.1109/EI2.2018.8582563>.
124. Zhang Ruiqi, Fang Jingyang, Tang Yi. Inertia emulation through supercapacitor energy storage systems // 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia. 2019. P. 1365–1370. <https://doi.org/10.23919/ICPE2019-ECCEAsia42246.2019.8796987>.
125. Grover H., Verma A., Bhatti T.S., Hossain M.J. Frequency regulation scheme based on virtual synchronous generator for an isolated microgrid // International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing. 2020. <https://doi.org/10.1109/PICC51425.2020.9362392>.
126. Nguyen Hong Viet Phuong, Van Tan Nguyen, Nguyen Binh Nam, Truong Thi Bich Thanh, Fanfei Lee, Le Quoc Cuong. Stability analysis of an islanded microgrid using supercapacitor-based virtual synchronous generator // 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development. 2020. P. 454–460. <https://doi.org/10.1109/GTSD50082.2020.9303070>.
127. Saraleb A.M., Khorsandi A., Hosseini Sh. Performance evaluation and determination of hybrid battery energy storage for optimal placement of virtual inertia in island microgrid // 26th International Electrical Power Distribution Conference. 2022. P. 49–53. <https://doi.org/10.1109/EPDC56235.2022.9817365>.
128. Krpan M., Kuzle I. Impact of ultracapacitor modelling on fast frequency control performance // International Conference on Smart Grids and Energy Systems. 2020. P. 326–331. <https://doi.org/10.1109/SGES51519.2020.00064>.
129. Jiang Qin, Zeng Xueyang, Li Baohong, Wang Shunliang, Liu Tianqi, Chen Zhe, et al. Time-sharing frequency coordinated control strategy for PMSG-based wind turbine // IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems. 2022. Vol. 12. Iss. 1. P. 268–278. <https://doi.org/10.1109/JETCAS.2022.3152796>.

References

1. Xu Xiwang, Sun Lu, An Ning, Li Fang, Su Lining, Qin Xiaohui. Simulation research of wind turbine frequency modulation based on different wind power penetration levels. In: *8th Renewable Power Generation Conference*. 2019;0435. <https://doi.org/10.1049/cp.2019.0435>.
2. Elistratov V.V. *Renewable energy*. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2016, 421 p. (In Russ.).
3. Lombardi P., Sokolnikova T., Suslov K., Voropai N., Styczynski Z.A. Isolated power system in Russia: a chance for renewable energies? *Renewable Energy*. 2016;90:532-541. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.016>.
4. Voropai N.I., Gubko M.V., Kovalev S.P., Massel L.V., Novikov D.A., Raikov A.N., et al. Challenges for digital energy development in Russia. *Problemy upravleniya = Control Sciences*. 2019;1:2-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.25728/pu.2019.1.1>.
5. Sabinin G.H. Theory and aerodynamic calculation of wind mills. In: *Proceedings of the Central Aerohydrodynamic Institute*. 1931;104:59-60. (In Russ.).
6. Fateev E.M. *Methodology for parameter determination of wind power calculations of wind mills*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR; 1957, 87 p. (In Russ.).
7. Bezrukih P.P. Renewable energy efficiency. Myths and facts. *Tekhnologii, sredstva mekhanizatsii i energeticheskoe oborudovanie*. 2016;6:11-24. (In Russ.). EDN: WDLFHB.
8. Lyather V.M. Development of wind energy. *Malaya energetika = Energy Fresh*. 2006;1-2:23-38. (In Russ.). EDN: JVJUWX.
9. Gribkov S.V., Yudaev I.V., Rakitov S.A. Multi-module wind power plants in guaranteed power supply systems. *Tekhnika v sel'skom hozyajstve*. 2012;2:26-29. (In Russ.). EDN: XTRIPZ.
10. Martínez J.C., Gómez S.A., Rodríguez Amenedo J.L.R., Alonso-Martínez J. Analysis of the frequency response of wind turbines with virtual inertia control. In: *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*. 9–12 June 2020, Madrid. Madrid: IEEE; 2020, p. 9160718.

<https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160718>.

11. Kirpichnikova I.M., Martyanov A.S., Solomin E.V. Power conversion in the windmill. *Alternativnaâ ènergetika i èkologiâ = Alternative Energy and Ecology*. 2010;1:93-97. (In Russ.).
12. He Ping, Wen Fushuan, Ledwich Gerard, Xue Yusheng. Investigation of the effects of various types of wind turbine generators on power-system stability. *Journal of Energy Engineering*. 2015;141(3):04014007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000176](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000176).
13. Udalov S.N., Manusov V.Z. *Modeling and fuzzy logic-based control of wind power plants: monograph*. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2013, 200 p. (In Russ.).
14. Dermentzoglou J.C., Karlis A.D. Development of linear models of static VAR compensators and design of controllers suitable for enhancing dynamic/transient performance of power systems including wind farms. *Electric power systems research*. 2011;81(4):922-929. (In Russ.). <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.11.021>.
15. McSwiggan D., Littler T. Analysis of fixed-speed wind farm low-frequency power pulsations using a wavelet-prony method. In: *IEEE PES General Meeting*. 2010. <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5590058>.
16. Ekwue A., Nanka-Bruce O., Rao Jhansi, McCool D. Dynamic stability investigations of the fault ride through capabilities of a wind farm. *Paper ID*. 2008;99.
17. Saidi A.S., Chokri B. Effect of static and dynamic load model on dynamic stability of distribution network with fixed and variable speed wind farm: a bifurcation analysis. *International Review on Modelling and Simulations*. 2012;5(4):1690-1699.
18. Morren J., De Haan S.W.H. Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2005;20(2):435-441. <https://doi.org/10.1109/TEC.2005.845526>.
19. Bialas H., Pawelek R., Wasiak I. A simulation model for providing analysis of wind farms frequency and voltage regulation services in an electrical power system. *Energies*. 2021;14(8):2250. <https://doi.org/10.3390/en14082250>.
20. Wang Yi, Meng Jianhui, Zhang Xiangyu, Xu Lie. Control of PMSG-based wind turbines for system inertial response and power oscillation damping. In: *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2015;6(2):565-574. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2394363>.
21. Li Wendan, Liu Yutian. SVG supplementary damping control for the dynamic stability of wind farm. In: *China International Conference on Electricity Distribution*. 2014;340-343. <https://doi.org/10.1109/CICED.2014.6991724>.
22. Wu Ziping, Gao Wenzhong, Yang Daye, Shi Yan. Comprehensive modeling and analysis of permanent magnet synchronous generator-wind turbine system with enhanced low voltage ride through capability. In: *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. 15–20 September, Raleigh, NC. Raleigh, NC: IEEE; 2012;2091-2098. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342554>.
23. Han Bing, Wang Yi, Li Heming, Zhang Xiangyu. Supplementary power control of PMSG-based wind farms for system dynamic stability. In: *International Conference on Electrical Machines and Systems*. 26-29 October 2013, Busan. Busan: IEEE; 2013, P. 291-295. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2013.6754469>.
24. Nagarajan S.T., Kumar N. Active power variation in wind farms by varying the number of wind turbine units. *International Journal of Sustainable Energy*. 2013;32(6):735-749. <https://doi.org/10.1080/14786451.2013.824876>.
25. Sun Jun, Sheng Lijian, Sun Yong, Zhou Zhenkai, Fu Rong. Stability simulation analysis of a hybrid wind-battery system. In: Zhang L., Song X., Wu Y. (eds.). *Communications in Computer and Information Science*. Singapore: Springer; 2016, vol. 645, p. 154-163. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2669-0_17.
26. Son Dae-Hee, Ali M., Kang Sang-Hee, Heo Jae-Haeng, Nam Soon-Ryul. A method for increasing the operating limit capacity of wind farms using battery energy storage systems with rate of change of frequency. *Energies*. 2018;11(4):758. <https://doi.org/10.3390/en11040758>.
27. Shazon Md.N.H., Masood N., Ahmed H.M., Deeba S.R., Hossain E. Exploring the utilization of energy storage systems for frequency response adequacy of a low inertia power grid // *IEEE Access*. 2021;9: 129933-129950. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3114216>.
28. Karamov D.N. Mathematical modeling of an autonomous power supply system using renewable energy sources. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;9: 133-140. (In Russ.).
29. Karamov D.N. Structural optimization of a stand-alone power supply system using renewable energy sources. In: *Collected works of young scientists for the 55th anniversary of Melentiev Energy Systems Institute SB RAS*. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the RAS, 2015, vol. 45. p. 84-89. (In Russ.).
30. Popel' O.S. Stand-alone power plants using renewable energy. *Energoberezhenie*. 2006;3:21-30. (In Russ.).
31. Udalov S.N., Achitaev A.A. *Automatic control of wind turbines with magnetic reduction of generator and turbine speeds: monograph*. Sayanogorsk: Sayano-Shushensky Branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education "Siberian Federal University"; 2021, 220 p. (In Russ.). EDN: WCRGMM.
32. Udalov S.N., Achitaev A.A., Pristup A.G., Bochenkov B.M., Pankratz Yu., Tarbill R.D. Increasing the regulating ability of a wind turbine in a local power system using magnetic continuous variable transmission. *Wind Engineering*. 2018;42(5):411-435. <https://doi.org/10.1177/0309524X18780404>.
33. Udalov S.N., Achitaev A.A., Pristup A.G., Bochenkov B.M. Increase of dynamic stability stoke of autonomous energy system based on wind energy installations under sudden load change. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*.

- Inzhiniring georesursov = Tomsk Polytechnic University. *Geo Assets Engineering*. 2016;327(8):89-98. (In Russ.).
34. Udalov S.N., Pristup A.G., Achitayev A.A. Research of magnetic transmission with variable gear ratio in a wind-driven generator for improving dynamic stability stroke. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2015;326(10):123-134. (In Russ.).
35. Vithanage V. A review on multi-agent system based energy management systems for micro grids. *AIMS Energy*. 2019;7(6):924-943.
36. Zhong Weilin, Murad M.A.A., Liu Muyang, Milano F. Impact of virtual power plants on power system short-term transient response. *Electric Power Systems Research*. 2020;189:106609. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2020.106609>.
37. Ismoilov S.T., Trufakin S.S., Fishov A.G. Multi-agent voltage control in electrical networks with distributed generation and active consumers. *Sovremennye napravleniya razvitiya sistem relejnoj zashchity i avtomatiki energosistem: trudy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Modern development trends of power system relay protection and automation systems: proceedings of the 4th International scientific-practical conference 3–7 June 2013, Ekaterinburg*. Ekaterinburg: Rossijskij nacional'nyj komitet SIGRE; 2013, p. 99-100. (In Russ.).
38. McArthur S., Davidson E.M., Catterson V.M., Dimeas A., Hatziaargyriou N.D., Ponci F, et al. Multi-agent systems for power engineering applications - part 2: technologies, standards and tools for building multi-agent systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2007;22(4):1743-1752. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.908471>.
39. Saleem A., Lind M., Veloso M.M. Multiagent based protection and control in decentralized electric power systems. In: *9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems AAMAS*. 2010;83-89.
40. Solanki J., Khushalani Solanki S., Schulz N. Multi-agent-based reconfiguration for restoration of distribution systems with distributed generators. *Integrated Computer-Aided Engineering*. 2010;17(4):331-346. <https://doi.org/10.3233/ICA-2010-0351>.
41. Solanki J., Khushalani Solanki S., Schulz N. A multi-agent solution to distribution systems restoration. *IEEE transactions on Power Systems*. 2007;22(3):1026-1034. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.901280>.
42. Kumar A., Tiwari L., Somwanshi D. Design architecture and optimization of multi agent based smart grid. In: *IEEMA Engineer Infinite Conference*. 2018. <https://doi.org/10.1109/ETECHNXT.2018.8385289>.
43. Ju Liwei, Zhang Qi, Tan Zhongfu, Wang Wei, Xin He, Zhang Zehao. Multi-agent-system-based coupling control optimization model for micro-grid group intelligent scheduling considering autonomy-cooperative operation strategy. *Energy*. 2018;157(2):1035-1052. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.097>.
44. Divényi D., Dán A.M. Agent-based modeling of distributed generation in power system control. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2013;4(4):886-893. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2013.2253811>.
45. Gao Yang, Ai Qian. Distributed multi-agent control for combined AC/DC grids with wind power plant clusters. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2018;12(3):670-677. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0689>.
46. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. A multi-agent control system of distributed generation plants. In: *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076128>.
47. Vorobev P, Huang Po-Hsu, Hosani M., Kirtley J.L., Turitsyn K. High-fidelity model order reduction for microgrids stability assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2017;33(1):874-887. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2707400>.
48. Chen Min-Rong, Zeng Guo-Qiang, Dai Yu-Xing, Lu Kang-Di. Fractional-order model predictive frequency control of an islanded microgrid. *Energies*. 2018;12(1):84. <https://doi.org/10.3390/en12010084>.
49. Sahoo A.K., Abhitharan K.P., Kalaivani A., Karthik T.J. Feasibility study of microgrid installation in an educational institution with grid uncertainty. In: *4th International Conference on Eco-friendly Computing and Communication Systems*. 2015;70:550-557. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.10.099>.
50. Boemer J.C., Gibescu M., Kling W.L. Dynamic models for transient stability analysis of transmission and distribution systems with distributed generation: an overview. In: *IEEE Bucharest PowerTech*. 2009. <https://doi.org/10.1109/PTC.2009.5282177>.
51. Derrouazin A., Mekkakia-Maaza N., Taleb R., Nacef M., Aillerie M. Low cost hybrid energiless smart management system applied for micro-grids. *Energy Procedia*. 2014;50:729-737.
52. Yakine K.E.N., Mena M., Hasni M., Boudour M. A novel optimal frequency control strategy for an isolated wind–diesel hybrid system with energy storage devices. *Wind Engineering*. 2016;40(6):497-517. <https://doi.org/10.1177/0309524X16671091>.
53. Muljadi E., McKenna H.E. Power quality issues in a hybrid power system. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2001;2(3):803-809. <https://doi.org/10.1109/TIA.2002.1003433>.
54. Zhang Yang, Lundblad A., Campana P.E. Benavente F., Yan Jinyue. Battery sizing and rule-based operation of grid-connected photovoltaic-battery system: a case study in Sweden. *Energy Conversion and Management*. 2017;133:249-263.
55. Muljadi E., Butterfield C. Yinger R., Romanowitz H. Energy storage and reactive power compensator in a large wind farm. In: *AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. 2004;114-123. <https://doi.org/10.2514/6.2004-352>.
56. Vernet A., Khayesi J.N., George V., George G., Bahaj A.S. How does energy matter? Rural electrification, entrepreneurship, and community development in Kenya. *Energy Policy*. 2019;126:88-98.
57. Arulampalam A., Barnes M., Engler A., et al. Control of power electronic interfaces in distributed generation microgrids. *International Journal of Electronics*. 2004;91(9):503-523. <https://doi.org/10.1080/00207210412331289023>.
58. Katiraei F., Iravani M.R., Lehn P.W. Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005;20(1):248-257. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.835051>.
59. Van Ackooij W., De Boeck J., Detienne B., Pan S., Poss M. Optimizing power generation in the presence of micro-grids.

- European Journal of Operational Research*. 2018;271(2):450-461. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.05.042>.
60. Lin Haiyang, Wang Qinxing, Wang Yu, Yiling Liu, Huang Nianzhi, Wennersten R., et al. A multi-agent based optimization architecture for energy hub operation. *Energy Procedia*. 2017;142:2158-2164. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.621>.
61. Ormandjieva O., Bentahar J., Huang Jinzi, Kuang Heng. Modelling multi-agent systems with category theory. *Procedia Computer Science*. 2015;52(1):538-545. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.031>.
62. González-Pardo A, Varona P, Camacho D, et al. Communication by identity discrimination in bio-inspired multi-agent systems. *Concurrency and Computation Practice and Experience*. 2012;24(6):589-603. <https://doi.org/10.1002/cpe.1866>.
63. Mehta R., Radhakrishnan B. M., Srinivasan D., Panda S.K., Rathore A.K. Market based multi-agent control of microgrid. In: *IEEE Ninth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*. 2014. <https://doi.org/10.1109/ISSNIP.2014.6827704>.
64. Colson C.M., Nehrir M.H. A review of challenges to real-time power management of microgrids. In: *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2009. <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275343>.
65. Guo Ge, Ding Lei, Han Qing-Long. A distributed event-triggered transmission strategy for sampled-data consensus of multi-agent systems. *Automatica*. 2014;50(5):1489-1496. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.03.017>.
66. Li Hongjie, Ming Chen, Shen Shigen, Wong W.K. Event-triggered control for multi-agent systems with randomly occurring nonlinear dynamics and time-varying delay. *Journal of the Franklin Institute*. 2014;351(5):2582-2599.
67. Wang Lingfeng, Wang Zhu, Yang Rui. Intelligent multiagent control system for energy and comfort management in smart and sustainable buildings. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012;3(2):605-617. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2178044>.
68. Funabashi T., Fujita G., Koyanagi K., Yokoyama R. Field tests of a microgrid control system. In: *Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference*. 2006. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2006.367750>.
69. Yousef H., Al-Badi A.H., Polycarpou A. Power management for hybrid distributed generation systems. *International Journal of Sustainable Engineering*. 2009;11(1):1-10. <https://doi.org/10.1080/19397038.2017.1387825>.
70. Kim Hak-Man, Kinoshita T. Multiagent system for Microgrid operation based on power market environment. In: *31st International Telecommunications Energy Conference*. 2009. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2009.5351771>.
71. Yuqin Xu, Li Zhang, Zengping Wang. Research on service restoration for large area blackout of distribution system with distributed generators. In: *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*. 2009. <https://doi.org/10.1109/SUPERGEN.2009.5347908>.
72. Li X.D., Xu Y.Q., Zhang L. Distribution service restoration with DGs based on multi-agent immune algorithm. In: *2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System*. 2009. <https://doi.org/10.1109/PEITS.2009.5407060>.
73. Yavuz L., Onen A., Muyeen S., Innocent K. Transformation of microgrid to virtual power plant – a comprehensive review. *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2019;13(11). <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.5649>.
74. Chen Junru, Liu Muyang, Milano F. Aggregated model of virtual power plants for frequency and voltage stability analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2021;36(5):4366-4375. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3063280>.
75. Marecek J., Roubalik M., Ghosh R., Shorten R.N., Wirth F.R. Predictability and fairness in load aggregation and operations of virtual power plants. *Automatica*. 2023;147:110743. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.03001>.
76. Moutis P., Georgilakis P.S., Hatziargyriou N.D. Voltage regulation support along a distribution line by a virtual power plant based on a center of mass load modeling. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018;9(4):3029-3038.
77. Zhong Weilin, Chen Junru, Liu Muyang, Murad M.A.A., Milano F. Coordinated control of virtual power plants to improve power system short-term dynamics. *Energies*. 2021;14(4):1182. <https://doi.org/10.3390/en14041182>.
78. Xin Huanhai, Gan Deqiang, Li Naihu, Li Huijie, Dai Chensong. Virtual power plant-based distributed control strategy for multiple distributed generators. *IET Control Theory & Applications*. 2013;7(1):90-98. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2012.0141>.
79. Häberle V., Fisher M.W., Araujo E.P., Dorfler F. Control design of dynamic virtual power plants: an adaptive divide-and-conquer approach. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2021;37(5):4040-4053. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3139775>.
80. Björk J., Johansson K.H., Dorfler F. Dynamic virtual power plant design for fast frequency reserves: coordinating hydro and wind. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*. 2022;10(3):1266-1278. <https://doi.org/10.1109/TCNS.2022.3181553>.
81. Tan Zhenfei, Zhong Haiwang, Xia Qing, Kang Chongqing, Wang Xuanyuan Sharon, Tang Honghai. Estimating the robust P-Q capability of a technical virtual power plant under uncertainties. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020;35(6):4285-4296. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.2988069>.
82. Ahangar R.A., Sheykholeslam A. Bulk virtual power plant, a novel concept for improving frequency control and stability in presence of large scale RES. *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*. 2014;4(10):1017-1044.
83. Zhong Weilin, Tzounas G., Liu Muyang, Milano F. On-line inertia estimation of virtual power plants. In: *22nd Power Systems Computation Conference*. 2022;212(2):108336. <https://doi.org/10.1016/j.ejpc.2022.108336>.
84. Li Pengfei, Hu Weihao, Hu Rui, Huang Qi, Yao Jun, Chen Zhe. Strategy for wind power plant contribution to frequency control under variable wind speed. *Renewable Energy*. 2019;130:1226-1236. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.046>.
85. Melhem B.M., Zhou Yakun, Liu Steven. Frequency support and stability analysis for an integrated power system with wind farms. In: *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2018. <https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8592707>.

86. Boyle J., Littler T., Muyeen S.M., Foley A.M. An alternative frequency-droop scheme for wind turbines that provide primary frequency regulation via rotor speed control. *Electrical Power and Energy Systems*. 2021;133(1):107219. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107219>.
87. Gomez L.A.G., Lourenço L.F.N., Salles M.B.C., Grilo A.P., Sguarezi A.J. Frequency support of grid connected wind turbine based-DFIG. In: *International Conference on Clean Electrical Power*. 2019. <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2019.8890110>.
88. Nadour M., Essadki A., Nasser T. Coordinated control using backstepping of DFIG-based wind turbine for frequency regulation in high wind energy penetrated system. *Hindawi, Mathematical Problems in Engineering*. 2020;3:8287949. <https://doi.org/10.1155/2020/8287949>.
89. Lyu Xue, Jia Youwei, Dong Zhaoyang. Adaptive frequency responsive control for wind farm considering wake interaction. *Journal of modern power systems and clean energy*. 2021;9(5):1066-1075. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2020.000237>.
90. Singh N., De Kooning J.D.M., Vandeveld L. Dynamic wake analysis of a wind turbine providing frequency support services. *IET Renewable Power Generation*. 2022. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12455>.
91. Xi Jiangbei, Geng Hua, He Xiuqiang. Adaptive VSG control scheme for large scale wind farms to improve frequency response characteristics. In: *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. 2019. <https://doi.org/10.1109/IAS.2019.8912376>.
92. Abazari A., Monsef H., Wu Bin. Load frequency control by de-loaded wind farm using the optimal fuzzy-based PID droop controller. *IET Renewable Power Generation*. 2019;13(1):180-190. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5392>.
93. Becker H., Valois-Rodriguez M.F., Holicki L., Malekian K., Gartmann P. Evaluation of wind power plants' control capabilities to provide primary frequency support during system restoration. In: *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies*. 2021. <https://doi.org/10.1109/SEST50973.2021.9543369>.
94. Junkai Huang, Zhifang Yang, Juan Yu, Juelin Liu, Ning Guo. Parameter design of DFIG-based controller for frequency stability improvement. In: *5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering*. 2020. <https://doi.org/10.1109/ACPEE48638.2020.9136320>.
95. Morovati S., Pulgar H. Control coordination between DFIG-based wind turbines and synchronous generators for optimal primary frequency response. *52nd North American Power Symposium*. 2020.
96. Zhang Liusheng, Xie Zhen, Chang Yuyang, Zhu Hong. Virtual inertia adaptive control strategy for DFIG wind turbines based on exponential function. In: *15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. 9–13 November, Kristiansand. Kristiansand: IEEE; 2020, p. 407-411. <https://doi.org/10.1109/ICIEA48937.2020.9248341>.
97. Yakout A.H., Kotb H., Sabry W. Power system stability improvement by employing strong action controller acting as virtual inertia controller. In: *22nd International Middle East Power Systems Conference*. 2021;562-568. <https://doi.org/10.1109/MEPCON50283.2021.9686209>.
98. Li Jianwei, Yang Qingqing, Yao Pengfei, Sun Qixing, Zhang Zhenyu, Zhang Min, et al. A novel use of the hybrid energy storage system for primary frequency control in a microgrid. *Energy Procedia*. 2016;103:82-87. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.253>.
99. Chen Xiaobin, Liu Hui, Su Jinshuo, Qin Risheng. The control strategy of energy storage system for primary frequency regulation and wind power ramp control. In: *5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering*. 2020;652-656. <https://doi.org/10.1109/ACPEE48638.2020.9136416>.
100. Guo Qiang, Huang Congzhi, Xue Zhiwei, Yin Yue, Liang Weifeng, Sheng Xinxin. Research on energy storage system participation in primary frequency regulation of large-scale wind turbines. In: *1st International Conference on Industrial Artificial Intelligence*. 2019. <https://doi.org/10.1109/ICIAI.2019.8850837>.
101. Martínez-Lucas G., Sarasúa J.I., Pérez-Díaz Ju.I., Martínez S., Ochoa D. Analysis of the implementation of the primary and/or inertial frequency control in variable speed wind turbines in an isolated power system with high renewable penetration. *Case Study: El Hierro Power System. Electronics*. 2020;9(6):901. <https://doi.org/10.3390/electronics9060901>.
102. Wang Zizhao, Shi Linjun, Feng, Peng Yan, Lou Bailiang, Lee Kwang Y. Coordinated droop and virtual inertia control of wind farm for frequency regulation. In: *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2020. <https://doi.org/10.1109/PES-GM41954.2020.9281722>.
103. Ochoa-Correa D., Martinez S. Analytical approach to understanding the effects of implementing fast-frequency response by wind turbines on the short-term operation of power systems. *Energies*. 2021;14(12):3660. <https://doi.org/10.3390/en14123660>.
104. Zhang Tianhai, Shu Jianjun, Wang Jingbo, Tang Keyi, Liu Nana. Adaptive virtual inertial control of wind turbine generators considering wind speed and load variation. In: *12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. 2020. <https://doi.org/10.1109/appeec48164.2020.9220484>.
105. Xiao Qi, Madonski R., Congzhi Huang, Yiming Ke. Tracking-differentiator-based dynamic virtual inertial control of offshore wind power plant for frequency regulation. *Electrical Power and Energy Systems*. 2022;141(106767):108150. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108150>.
106. Krpan M., Kuzle I. Dynamic characteristics of virtual inertial response provision by DFIG-based wind turbines. *Electric Power Systems Research*. 2020;178:106005. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106005>.
107. Bastiani B.A., De Oliveira R.V. Adaptive MPPT control applied to virtual synchronous generator to extend the inertial response of type-4 wind turbine generators. *Sustainable Energy Grids and Networks*. 2021;27:100504. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100504>.

108. Zhong Cheng, Lv Yueming, Zhou Yang, Li Huayi. An equivalent rotor speed compensation control of PMSG-based wind turbines for frequency support in islanded microgrids. *Frontiers in Energy Research*. 2021;9:717327. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.717327>.
109. Zhu Ying, Liu Sheng, Wang Wei. Comprehensive coordinated control strategy of PMSG-based wind turbine for system inertia support. *IET Renewable Power Generation*. 2021;15:1915-1926. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12115>.
110. Yang Li, Hu Zhijian, Xie Shiwei, Kong Shunfei, Lin Weiwei. Adjustable virtual inertia control of supercapacitors in PV-based AC microgrid cluster. *Electric Power Systems Research*. 2019;173(3053):71-85. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.04.011>.
111. Zeng Xueyang, Li Xiaopeng, Wang Shunliang, Liu Tianqi, Zhang Chun, Zhang Huajie. Virtual inertia control and short-term primary control for PMSG-based wind turbine using supercapacitor. In: *4th International Conference on HVDC*. 2020;191-196. <https://doi.org/10.1109/HVDC50696.2020.9292799>.
112. Hasan N.S., Rosmin N., Nordin N.M., Hassan M.Yu. Virtual inertial support extraction using a super-capacitor for a wind-PMSG application. *IET Renewable Power Generation*. 2019;13(10):1802-1808. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5655>.
113. Hasan N.S., Rosmin N., Nordin N.J.M., Mustaamal A.H., Husin S.M., Aripriharta A., et al. Virtual inertia support for wind turbine system. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2020;17(2):629-636. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v17.i2.pp629-636>.
114. Mauricio J.M., Malamaki K.-N., Maza-Ortegaet J.M., Kryonidis G., Barragan-Villarejoal M., Gkavanoudis S.I. Short-term energy recovery control for virtual inertia provision by renewable energy sources. In: *IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics*. 2021. <https://doi.org/10.1109/ISIE45552.2021.9576213>.
115. Zhu Yuyan, Wang Huaiyuan, Zhu Zhenshan. Improved VSG control strategy based on the combined power generation system with hydrogen fuel cells and super capacitors. *Energy Reports*. 2021;7:6820-6832. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.10.056>.
116. Fregelius M., Lundin U. Hardware implementation of a synthetic inertia system for grid stability. In: *8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications*. 2019;186-190. <https://doi.org/10.1109/ICRERA47325.2019.8997097>.
117. Huiyu Miao, Chenyu Zhang, Mei Fei, Yun Yang, Jianyong Zheng. A novel control strategy for hybrid energy system in virtual synchronous generator. In: *13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. 2018;2244-2249. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2018.8398083>.
118. Shadabi H., Kamwa I. Enabling hybrid energy storage systems in VSC-based MTDC grids for decentralized fast frequency response control in low-inertia AC/DC systems. *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2021;16:897-911. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12335>.
119. Jithin T., Rajeev T., Jithin S. Inertia control of hybrid AC/DC microgrid using supercapacitors. In: *Second International Conference on Power, Control and Computing Technologies*. 2022. <https://doi.org/10.1109/ICPC2T53885.2022.9776860>.
120. Fang Jingyang, Tang Yi, Li Hongchang, Blaabjerg F. The role of power electronics in future low inertia power systems. In: *IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition*. 2018. <https://doi.org/10.1109/PEAC.2018.8590632>.
121. Fang Jingyang, Tang Yi, Li Hongchang, Li Xiaoqiang. A battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for implementing the power management of virtual synchronous generators. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018;33(4):2820-2824. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2759256>.
122. Chen Liang, Blaabjerg Frede. Virtual synchronous generator based on type-IV wind turbine with supercapacitor as storage. In: *IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia*. 18–21 July 2021, Chengdu. Chengdu: IEEE; 2021, p. 1194-1200. <https://doi.org/10.1109/ICPSAsia52756.2021.9621445>.
123. Shi Mingming, Chen Hongfei, Zhang Chenyu, Mei Fei, Fang Jicheng, Huiyu Miao. A virtual synchronous generator system control method with battery SOC feedback. In: *2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration*. 2018. <https://doi.org/10.1109/EI2.2018.8582563>.
124. Zhang Ruiqi, Fang Jingyang, Tang Yi. Inertia emulation through supercapacitor energy storage systems. In: *10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia*. 2019;1365-1370. <https://doi.org/10.23919/ICPE2019-ECCEAsia42246.2019.8796987>.
125. Grover H., Verma A., Bhatti T.S., Hossain M.J. Frequency regulation scheme based on virtual synchronous generator for an isolated microgrid. In: *International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing*. 2020. <https://doi.org/10.1109/PICC51425.2020.9362392>.
126. Nguyen Hong Viet Phuong, Van Tan Nguyen, Nguyen Binh Nam, Truong Thi Bich Thanh, Fanfei Lee, Le Quoc Cuong. Stability analysis of an islanded microgrid using supercapacitor-based virtual synchronous generator. In: *5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development*. 2020;454-460. <https://doi.org/10.1109/GTSD50082.2020.9303070>.
127. Sarableh A.M., Khorsandi A., Hosseinian Sh. Performance evaluation and determination of hybrid battery energy storage for optimal placement of virtual inertia in island microgrid. In: *26th International Electrical Power Distribution Conference*. 2022;49-53. <https://doi.org/10.1109/EPDC56235.2022.9817365>.
128. Krpan M., Kuzle I. Impact of ultracapacitor modelling on fast frequency control performance. In: *International Conference on Smart Grids and Energy Systems*. 2020;326-331. <https://doi.org/10.1109/SGES51519.2020.00064>.
129. Jiang Qin, Zeng Xueyang, Li Baohong, Wang Shunliang, Liu Tianqi, Chen Zhe, et al. Time-sharing frequency coordinat-

ed control strategy for PMSG-based wind turbine. *EEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*. 2022;12(1):268-278. <https://doi.org/10.1109/JETCAS.2022.3152796>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Астапов Вячеслав Юрьевич,
аспирант,
отдел электроэнергетических систем
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
✉ ast.slava@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-5048-2394>

Вклад автора

Автор выполнил аналитическую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 04.05.2023 г.;
одобрена после рецензирования 05.07.2023 г.;
принята к публикации 10.09.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vyacheslav Yu. Astapov,
Postgraduate Student,
Department of Electric Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
✉ ast.slava@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-5048-2394>

Contribution of the author

The author performed a comprehensive analysis, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Conflict of interests

The author declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by author.

Information about the article

The article was submitted 04.05.2023;
approved after reviewing 05.07.2023;
accepted for publication 10.09.2023.



Original article
EDN: PYGRDK
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-727-736

Allocation of power losses and energy in the distribution network

Yana I. Krupeneva^{1✉}, Evgeny V. Boloev², Irina I. Golub³

¹LLC "Engineering Center "EuroSibEnergо", Irkutsk, Russia

¹⁻³Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

^{2,3}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The goal is to determine methods for calculating power losses in a three-phase four-wire low voltage distribution network using measurements of a balance smart meter and consumer smart meters, and to establish the factors influencing the power losses and their allocation among individual network wires, loads, and consumers. The study involved examining three methods for determining power losses for current measurement snapshot. The first method suggests calculating losses as the difference between the power supplied to the network and the total power consumed. The second method calculates power losses using the contribution method. The third method, which in addition to measurement information requires knowledge of the topology and parameters of the network components, determines power losses based on the results of the state estimation method. The research proposes an algorithm for transition from a four-wire distribution network modeling to a three-wire one. The algorithm allocates power losses of the neutral wire among the phase wires. The findings indicate that the negative losses in the network with unbalanced phase loads are caused by the presence at the nodes of the least loaded phase of higher voltage than the voltage at the power supply node. The reason for higher losses in phases with minimal load is the uneven allocation of loads in the phases. In addition, the study reveals that the power loss values obtained by the contribution method, i.e. directly from the measurements of smart meters, are closer to the losses determined from the readings of the balance meter and consumer meters, compared to the losses found from the state estimation results. The considered methods for calculation and allocation of power losses are illustrated by an example of a real-world distribution network equipped with smart meters. The paper demonstrates the examples of allocating total power losses between phase wires and a neutral wire, among phase wires only, and between total loads at phase nodes and individual consumers in phases.

Keywords: distribution network, smart meters, power losses, allocation of power losses

Acknowledgements: The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0001) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030.

For citation: Krupeneva Ya.I., Boloev E.V., Golub I.I. Allocation of power losses in the distribution network. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):727-736. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-727-736>. EDN: PYGRDK.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья
УДК 621.311

Разнесение потерь мощности и энергии в распределительной сети

Я.И. Крупенёва^{1✉}, Е.В. Болоев², И.И. Голуб³

¹Инженерный центр «ЕвроСибЭнерго», г. Иркутск, Россия

¹⁻³Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

^{2,3}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель – определение способов вычисления потерь энергии в трехфазной четырехпроводной распределительной сети низкого напряжения с использованием измерений балансового интеллектуального счетчика и интеллектуальных счетчиков потребителей, и установление факторов, влияющих на потери, а также разнесение потерь между отдельными проводами сети, нагрузками и потребителями. Анализируется три способа расчета по-

терь для текущего среза измерений. В первом способе потери определяются как разность поступающей в сеть мощности и мощности суммарного потребления, во втором расчет потерь производится методом адресности. В третьем способе, для которого помимо информации об измерениях требуется знание топологии и параметров элементов схемы сети, потери определяются по результатам метода оценивания состояния. Предложен алгоритм перехода от четырехпроводного моделирования распределительной сети к трехпроводному, заключающийся в разнесении потерь мощности в нейтральном проводе между фазными проводами. Показано, что в сети с несбалансированными нагрузками фаз причиной отрицательных потерь является наличие в узлах наименее загруженной фазы более высоких напряжений, чем напряжение в узле питания. Установлено, что причиной более высоких потерь в фазах с минимальной нагрузкой является неравномерность распределения нагрузок в фазах. Кроме того, установлено, что значения потерь, полученных методом адресности, т.е. непосредственно по измерениям интеллектуальных счетчиков, ближе к потерям по показаниям балансового счетчика и счетчиков потребителей по сравнению с потерями, найденными по результатам оценивания состояния режима сети. Рассмотренные методы расчета и разнесения потерь проиллюстрированы на примере реальной распределительной сети, оснащенной интеллектуальными счетчиками, приведены примеры разнесения суммарных потерь мощности между фазными проводами и нейтральным проводом, только между фазными проводами, между суммарными нагрузками в узлах фаз и отдельными потребителями в фазах.

Ключевые слова: распределительная сеть, интеллектуальные счетчики, потери активной мощности, разнесение потерь

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0001) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг.

Для цитирования: Крупенёва Я.И., Болоев Е.В., Голуб И.И. Разнесение потерь мощности в распределительной сети // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 727–736. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-727-736>. (In Eng.). EDN: PYGRDK.

INTRODUCTION

Large-scale introduction of smart meters in low-voltage secondary distribution networks allows measurement of energy consumed by loads and of voltage magnitudes. Such information is the main means for solving the problems of state monitoring and for assessment of power losses and their reduction that determine the efficiency of an intelligent network.

The paper analyzes possible approaches to determining energy losses from measurements of smart meters and the factors affecting the allocation of losses between phase wires and the neutral wire. We show the possibility of allocating losses between total loads or individual consumers connected to phases of a three-phase four-wire secondary distribution network.

The problem of losses allocation between consumers is not a new one. It emerged in the late 1990s in connection with the development of market relations in the electric power industry when a need for determination of the share of energy sources in power supply of specific loads and for determination of losses occurring in the networks during energy transmission that are to be compensated by players of the electricity market became obvious. An unambiguous solution using matrix [1] and graph [2] algorithms that can also be applied to an opened distribution network was found to the problem of power flows allocation in the transmission network. For a unique allocation of power losses between consumers, the losses were proposed to be determined as a difference between power transmitted to a consumer from the power

source and power received by a consumer [3]. The paper demonstrates that this method is also valid for an opened distribution network, however, many papers published recently analyze other possible approaches to the allocation of losses between phases of a distribution network or between phases and a neutral wire [4–8].

The most important characteristics of a three-phase four-wire network that distinguish it from high-voltage networks are: operation of a network as an opened one; imbalance of phase loads that can be single-phase, two-phase, and three-phase ones; the impedance ratio, as a rule, is $r/x > 1$ [9]; equal dependence of voltage on both active and reactive power. To take into account the imbalance of a secondary distribution network, its three-phase four-wire model [10, 11] shown in Fig. 1 is used.

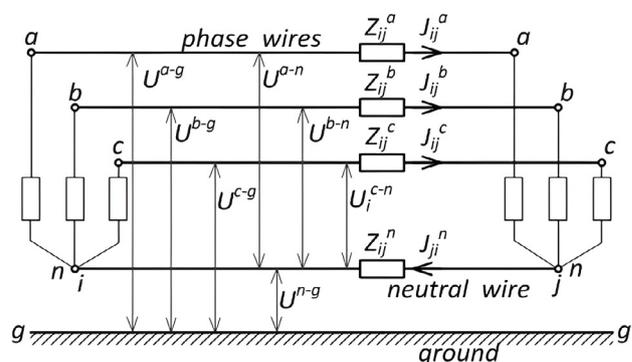


Fig. 1. The equivalent circuit for a section of a three-phase four-wire network without a ground conductor
Рис. 1. Схема замещения секции трехфазной четырехпроводной сети без заземлений нейтрального провода

All the considered approaches to calculating the power losses in the distribution network use data on the average hourly measurements in the supply node and in the load nodes of each phase of active and reactive power of loads and voltage magnitudes relative to a neutral wire [9] that are synchronously made by smart meters [13, 14] over a long period of time. That information is stored in the protocols of Automatic System for Commercial Accounting of Power Consumption (ASCUE) [12] analogous to the Advanced Metering Infrastructure (AMI) [14, 15].

METHODS FOR CALCULATION AND ALLOCATION OF LOSSES IN THE DISTRIBUTION NETWORK

Use of balance meter measurements. Under the availability of a smart three-phase balance meter in the power supply node of a distribution network the difference between energy supplied to each phase and total energy consumed by its loads within an hour is the easiest way to calculate hourly losses, total hourly energy losses in the feeder being equal to total energy losses in three phases. This method of loss calculation does not require data on the parameters of the network equivalent circuit, but requires information about the topology of the distribution network and information about the phases to which the smart meters are connected [15–17]. It also does not allow one to divide losses into technical and commercial ones, losses due to electricity theft or due to non-recorded power consumption, for example, for lighting. However, should all the consumers be equipped with smart meters, and should there be no electricity theft, it is the difference between energy supplied to the phase and total energy supplied to consumers can, in our opinion, be the best criterion for evaluating the approaches to allocation of total losses in the feeder between phases.

Calculation of losses based on the results of state estimation. Use of the results of state estimation that unlike the previous method requires the availability of additional data on the parameters of components of an equivalent circuit of a distribution network is the most common way of loss calculation.

In the simple iteration method used in the paper, an iteration-based calculation of voltage at each k -th iteration of state estimation includes three stages [11, 18, 19].

Nodal currents in phase wires and in a neutral wire are determined first based on the measurements of power and voltage [11]. Then voltages

$$\dot{U}_{i_k}^{f,n} = u_{i_k}^{f,n} + j u_{i_k}^{f,n} \text{ of phase } f = a, b, c \text{ wires}$$

to ground and of a neutral n wire to ground are determined based on the solution of an over determined system of a linear equation for phase wire and a neutral wire [11]. Voltages of phase wires to a neutral wire are finally determined as a vector difference between vectors of nodal voltages of phase wires to ground and nodal voltages of a neutral wire to ground $\dot{U}_{i_{k+1}}^{f-n} = \dot{U}_{i_k}^f - \dot{U}_{i_k}^n$ [11].

Use of voltages of phase wires and a neutral wire to ground $\dot{U}_{i_k}^{f,n}$ and of phase wires to a neutral wire $\dot{U}_{i_{k+1}}^{f-n}$ allows independent consideration of load flows both in a four-wire network and in a three-wire network; in this case only currents I_{i-j}^f in phase wires coincide in both representations of the network [11].

Load flows $P_{i-j}^{f,n}$, $P_{j-i}^{f,n}$ at the beginning and at the end of sections $i - j$ of phase wires and of a neutral wire in the four-wire network that are computed using conjugated complexes of currents $I_{i-j}^{*f,n}$ and voltages of phase wires to ground and of a neutral wire to ground [11] are equal to:

$$\begin{aligned} P_{i-j}^{f,n} &= \text{real} \left(I_{i-j}^{*f,n} \dot{U}_i^{f,n} \right), \\ P_{j-i}^{f,n} &= \text{real} \left(I_{i-j}^{*f,n} \dot{U}_j^{f,n} \right). \end{aligned} \tag{1}$$

Load flows P_{i-j}^{f-n} , P_{j-i}^{f-n} at the beginning and the end of sections $i - j$ of a feeder are determined using voltages of phase wires to neutral wire [11] and differ from load flows in phase wires P_{i-j}^f, P_{j-i}^f by the value $I_{i-j}^{*f} \dot{U}_i^n$, $I_{i-j}^{*f} \dot{U}_j^n$ that is equal to a production of a conjugated complex of current in section $I_{i-j}^{*f,n}$ by voltage of a neutral wire to ground

$$\begin{aligned} P_{i-j}^{f-n} &= \text{real} \left(I_{i-j}^{*f} \dot{U}_i^{f-n} \right) = \text{real} \left(I_{i-j}^{*f} \dot{U}_i^f - I_{i-j}^{*f} \dot{U}_i^n \right), \\ P_{j-i}^{f-n} &= \text{real} \left(I_{i-j}^{*f} \dot{U}_j^{f-n} \right) = \text{real} \left(I_{i-j}^{*f} \dot{U}_j^f - I_{i-j}^{*f} \dot{U}_j^n \right). \end{aligned} \tag{2}$$

Power losses in the section using expressions (1) are determined as

$$\Delta P_{i-j}^{f,n} = P_{i-j}^{f,n} - P_{j-i}^{f,n} = \text{real} \left(I_{i-j}^{*f,n} \left(\dot{U}_i^{f,n} - \dot{U}_j^{f,n} \right) \right), \tag{3}$$

and for expression (2) as

$$\Delta P_{i-j}^{f-n} = P_{i-j}^{f-n} - P_{j-i}^{f-n} = \text{real} \left(I_{i-j}^{*f} \left(\dot{U}_i^f - \dot{U}_j^f \right) - I_{i-j}^{*f} \left(\dot{U}_i^n - \dot{U}_j^n \right) \right). \tag{4}$$

The value of expression $I_{i-j}^{*f} \left(\dot{U}_i^n - \dot{U}_j^n \right)$ determines the difference between active power losses in the phases of a three-phase three-wire network and those in the four-wire network [11].

The value of expression determines the difference between active power losses in the phases of a three-wire three-phase network and those in the four-wire network

$$\Delta P_{i-j}^n = \text{real} \left(-I_{i-j}^{*a} (\dot{U}_i^n - \dot{U}_j^n) - I_{i-j}^{*b} (\dot{U}_i^n - \dot{U}_j^n) - I_{i-j}^{*c} (\dot{U}_i^n - \dot{U}_j^n) \right) = \text{real} \left(I_{i-j}^{*n} (\dot{U}_i^n - \dot{U}_j^n) \right), \quad (5)$$

where conjugated current in a neutral wire equals the sum of currents in phase wires with a negative sign [18]

$$I_{i-j}^{*n} = \left(I_{a_{i-j}}^n - j I_{p_{i-j}}^n \right) = - \left(I_{i-j}^{*a} + I_{i-j}^{*b} + I_{i-j}^{*c} \right). \quad (6)$$

Thus, expression (6) allows one to allocate losses in a neutral wire between phase wires. Possibility of occurrence of negative values of losses in separate sections of feeders and total losses in separate phases is an important peculiarity of such an allocation of losses in a neutral wire.

CALCULATION OF LOSSES DIRECTLY BASED ON READINGS OF SMART METERS

Calculation of losses based on the data of average hourly measurements of single-phase and three-phase smart meters installed in the nodes of consumers' connection to a distributed feeder is another possibility of using expression (4) for determination of power losses [12, 20]. It should be noted that voltage magnitudes in the load nodes that are used in this method for losses calculation are voltages to a neutral wire [12].

Total losses of active power in the phase in this method are determined as a sum of losses that is equal to difference between power supplied from the supply node of a distribution network numbered as 1 to every load node i , and to load in the i -th node

$$\Delta P^{f-n} = \sum_{i=2}^m \left(P_{1-i}^{f \text{ trans}} - P_i^f \right) = \sum_{i=2}^m \left(\frac{U_1^{f-n}}{U_i^{f-n}} P_i^f - P_i^f \right) = \sum_{i=2}^m \left(\frac{U_1^{f-n} - U_i^{f-n}}{U_i^{f-n}} P_i^f \right), \quad (7)$$

hence, for calculation of losses occurring during transmission of average hourly power (energy per hour) from node 1 of feeder supply to i -th load node or to i -th consumer, simultaneous measurements in each phase of voltage magnitude to a neutral wire in nodes 1 and i , and active power of load in the i -th node of the feeder or of the i -th consumer are needed. Identification of phases of consumer connection to feeders is a required initial stage of such calculations.

Analysis of expression (7) explains occurrence of negative power losses in the feeder's sections. Imbalance of phase loads in a three-phase distribution network originates currents in a neutral

wire. The higher the imbalance of phase currents, the higher will be the current occurring in a neutral wire. Current increase in a neutral wire causes increase of voltage in it and change in the voltages of phase wires to a neutral wire. It is known [11] that this voltage in the least loaded phase, especially in its dangling node, may become higher than voltage in the power supply node when difference between voltages $U_1^{f-n} - U_i^{f-n}$ and power losses at estimation of its transfer from a supply node to a node with higher voltage will be negative.

Determination of consumer's load contribution into total losses for every phase requires neither the knowledge on topology nor on parameters of an equivalent circuit. It suffices to have a list m of consumers and readings of voltage and load for each consumer. Should several smart meters be installed on the supports of the main feeder, each support can be assigned the number of a load node, and then an average hourly total capacity of load and average hourly voltage magnitude can be computed for each phase.

It is this information on readings in the nodes of each phase that is used for assessing the contribution of losses in the phase into total losses in the feeder. Lower requirements to observability (lower than those to state estimation) are a peculiar feature of such calculation of losses. Actually, computation of active power losses does not require knowledge on reactive loads, whereas under the lack of measurements in some nodes or at individual consumers one can assess only losses related to power transfer to consumers equipped with smart meters.

ILLUSTRATION OF THE WAYS OF ALLOCATION OF LOSSES IN A LOW-VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORK FEEDER

Methods for losses computation and allocation are further exemplified by data taken from ASKUE Protocols of a real feeder of a low voltage distribution network for maximum winter and minimum summer loads. There are 25 private houses with three-phase and single-phase loads that are connected to a feeder, Fig. 2. Average hourly values of active and reactive power and magnitudes of voltages in phases are measured by three-phase and single-phase smart meters installed on nine out of 11 supports of the main feeder. Average hourly values of active and reactive power entering from the feeder supply node and voltage in the supply node are measured by a balancing three-phase meter. Phases of consumer connection to

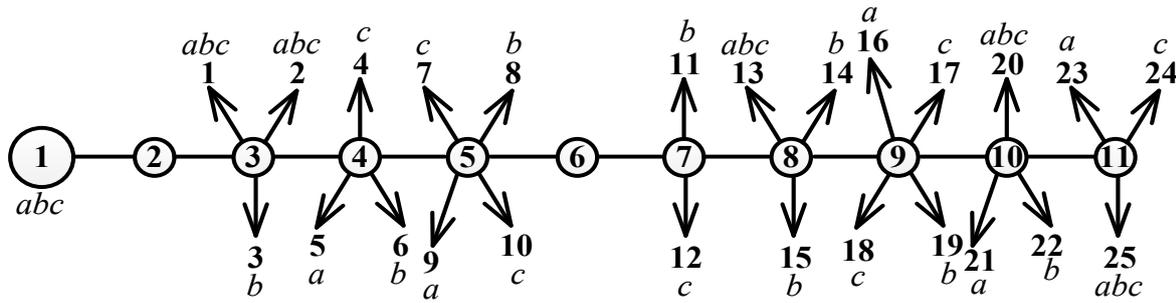


Fig. 2. A feeder of a distribution network
Рис. 2. Фидер распределительной сети

the feeder were determined at the initial stage of studies. It showed that 10 consumers are connected to phase a; 13 consumers are connected to phase b, and 12 consumers are connected to phase c. Average hourly magnitudes of active and reactive loads and average readings of voltages in nine nodes of phases were calculated for meters; phases b and c included eight load nodes, and phase a included seven load nodes.

Fig. 3 shows current values in phases and in a neutral wire that were obtained based on the results of state estimation for the first section of a feeder in the distribution network that is connected to a power source for 40 hours of maximum loads. Analysis of curves proved the imbalance of phase currents, current of phase a being the maximum one that causes high current in a neutral wire that is comparable to currents in phases a and b.

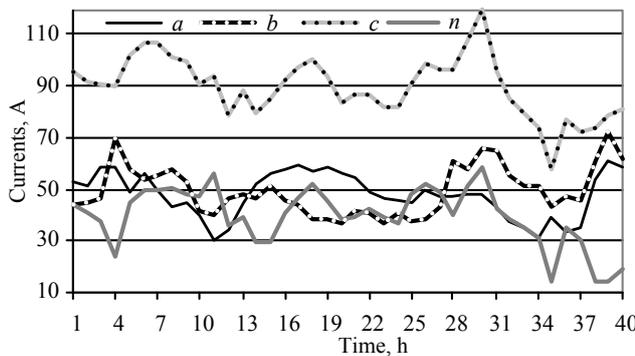


Fig. 3. Currents in phases and a neutral wire of the first section of the feeder for 40 hourly slices of measurements
Рис. 3. Токи в фазах и нейтральном проводе первой секции фидера для 40-часовых срезов измерений

Ranging the average hourly power losses (hourly energy losses) in phases and in a neutral wire that were obtained based on the results of state estimation, Fig. 4, coincides with ranging the currents of phases the maximum losses for which occur in phase c, and losses in phase a exceed losses in phase b.

Additions to hourly energy losses in phases of

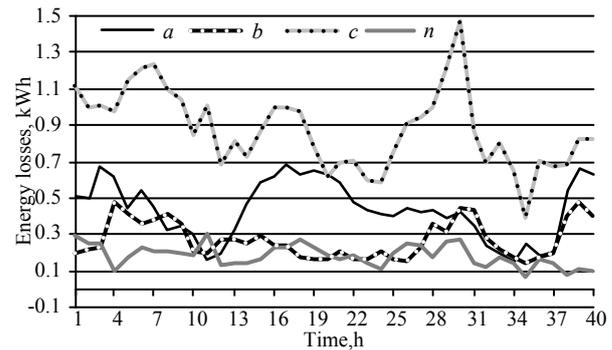


Fig. 4. Hourly energy losses in phases and a neutral wire of the feeder for 40 hourly slices of measurements

Рис. 4. Часовые потери энергии в фазах и нейтральном проводе фидера для 40-часовых срезов измерений

a low-voltage feeder that are totally equal to energy losses in a neutral wire are shown in Fig. 5, thus, positive additions correspond to a highly loaded phase c, whereas negative additions belong mainly to phases a and b.

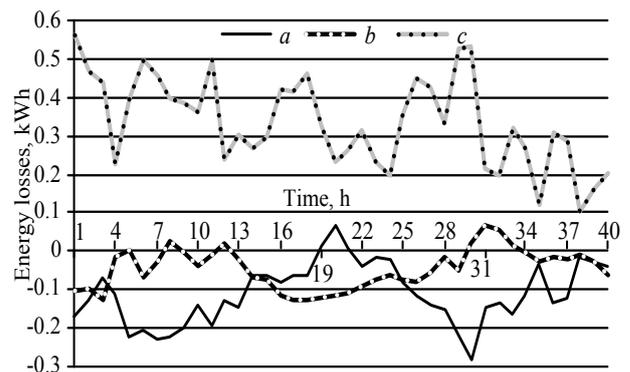


Fig. 5. Allocation of hourly energy losses in a neutral wire between phase wires when a four-wire network is represented as a three-wire one

Рис. 5. Разнесение часовых потерь энергии в нейтральном проводе между фазными проводами при представлении четырехпроводной сети как трехпроводной

Hourly energy losses in phase wires that were obtained after re-allocation of losses in the neutral wire between them following expression (4) are given in Fig. 6, which shows that the phase with

maximum losses coincides with a phase with maximum current.

Closeness of losses in the most loaded phase *c* chosen for comparison to losses determined for this phase using readings of the balance meter proves validity of allocation of losses in the neutral wire between phase wires Fig. 6.

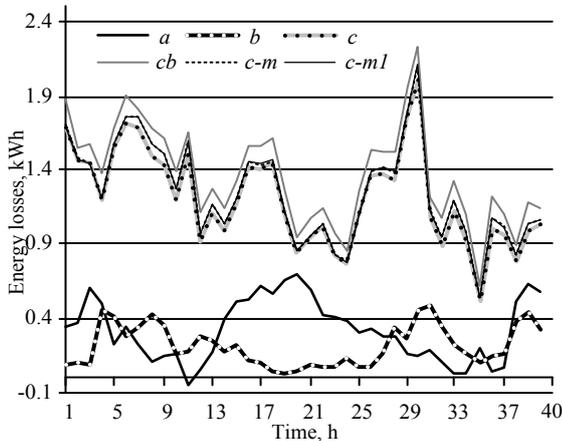


Fig. 6. Hourly energy losses in phases *a*, *b*, *c* for the case of three-phase representation of feeder for 40 hourly slices of measurements; *cb* – energy losses in phase determined using readings of a balance meter; *c-m* and *c-m1* – energy losses in phase determined directly based on measurements of smart meters using average loads and voltage magnitudes in the feeder nodes, and loads and voltages of individual consumers

Рис. 6. Часовые потери энергии в фазах при трехфазном представлении фидера для 40 часовых срезов измерений, *cb* – потери энергии в фазе *c*, найденные с использованием показаний балансного счетчика; *c-m* и *c-m1* – потери энергии в фазе *c*, найденные непосредственно по измерениям интеллектуальных счетчиков по средним нагрузкам и модулям напряжений в узлах фидеров и по нагрузкам и напряжениям отдельных потребителей

Fig. 7 shows, for comparison, hourly power losses in phase wires for 40 slices of measurements at minimum-load conditions that have small negative power losses in all phases. Presence of

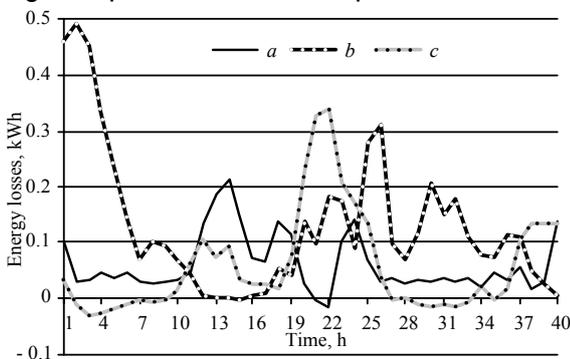


Fig. 7. Hourly energy losses in phases for the case of three-wire representation of a four-wire network for 40 slices of measurement at the minimum load
Рис. 7. Часовые потери энергии в фазах при трехпроводном представлении четырехпроводной сети для 40 срезов измерений режима минимальных нагрузок

negative power losses is the main property typical of a distribution network that is discussed in many papers [5–8].

The second peculiar feature of a distribution network is availability of higher losses in the minimum loaded phase (i.e., in the phase with minimum total load) than losses in the phase with higher total load. Losses in the distribution network are due to irregularity of loads in phases when loads at the end of a phase are higher than loads at its beginning. Power losses in the wire with uniformly distributed load are three times lower than power losses at the same load applied at the end of the wire [21]. Presence of maximum total losses in phase *a* with minimum total load is illustrated by graphs in Fig. 8 and Fig. 9.

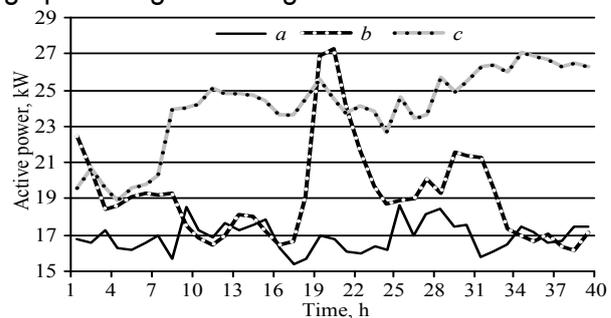


Fig. 8. Average hourly values of total loads in feeder phases within 40 hours

Рис. 8. Среднечасовые значения суммарных нагрузок в фазах фидера в течение 40 ч

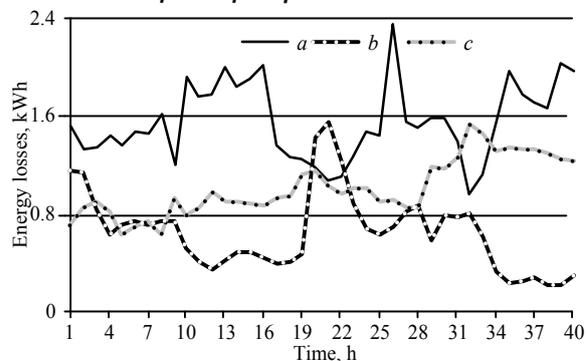


Fig. 9. Hourly energy losses in the feeder phases within 40 hours

Рис. 9. Часовые потери энергии в фазах фидера в течение 40 ч

Inconsistency of total loads and losses is due to irregularity of total phase loads that for phase *a* are the lowest at the beginning of a feeder Fig. 10, and the highest at the end of a feeder Fig. 11.

For confirming the coincidence of results on allocation of total losses between phases based on the results of state estimation and a balance meter with directly measured losses using expressions (7) for *m* loaded nodes and for *m1* consumers, where $m1 > m$, the latest losses in the most highly loaded phase in the mode of maximum load were added to graphs Fig. 6.

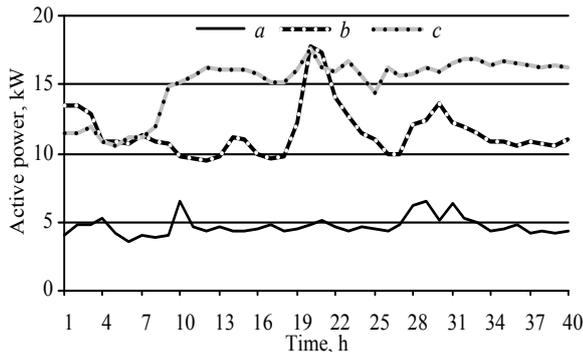


Fig. 10. Average hourly values of total loads of phases at the beginning of a feeder within 40 hours

Рис. 10. Среднечасовые значения суммарных нагрузок фаз в начале фидера в течение 40 ч

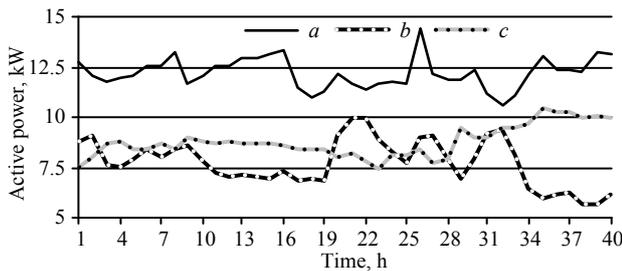


Fig. 11. Average hourly values of total loads of phases at the end of a feeder within 40 hours

Рис. 11. Среднечасовые значения суммарных нагрузок фаз в конце фидера в течение 40 ч

Analysis of graphs shows that losses by consumer loads are most close to the test estimate of losses measured by a balance meter, then come losses by loads of nodes and, finally, losses determined using the results of state estimation. When comparing losses, the sequence indicated goes with total values of losses for the phase c within 40 hours and are equal to 1.146 kWh, 1.068 kWh, 1.067 kWh, 1.030 kWh.

Possibilities for determining the contribution of individual loads into total losses have been illustrated for the conditions of minimum summer loads in Fig. 12 as a daily curve with accumulation that represents allocation of hourly energy losses in phases a, b, c between loads of the phase nodes and loads of houses connected to the phases, respectively. Hourly energy losses during its transmission from the supply node to every load node were determined based on measurements of loads and voltage magnitudes using expression (7). For example, losses caused by power transfer to load of node 11 of phase c include losses that occurred during power transfer to loads of houses 24 and 25.

CONCLUSIONS

The research solves the problem of determination of total power losses in a three-phase four-wire distribution network and allocation of those losses

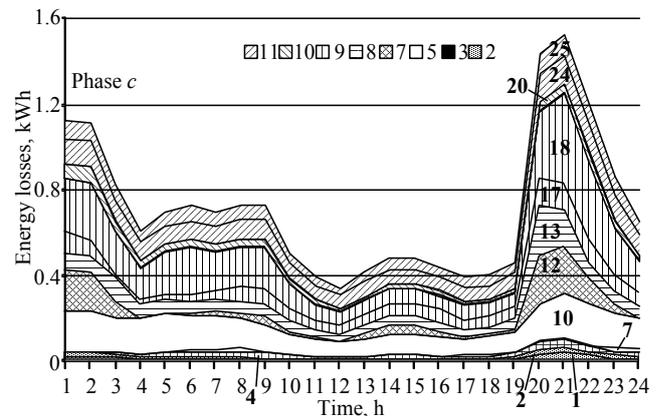
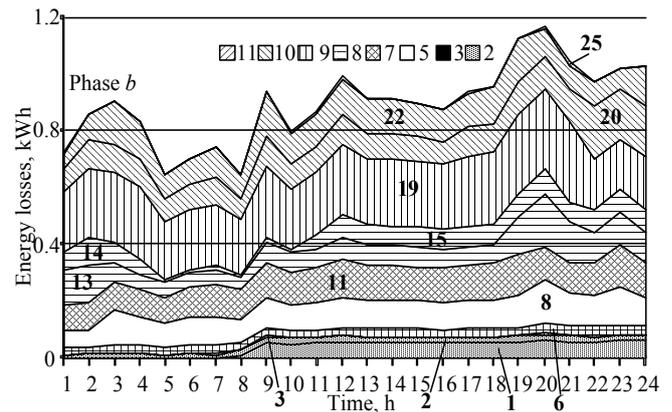
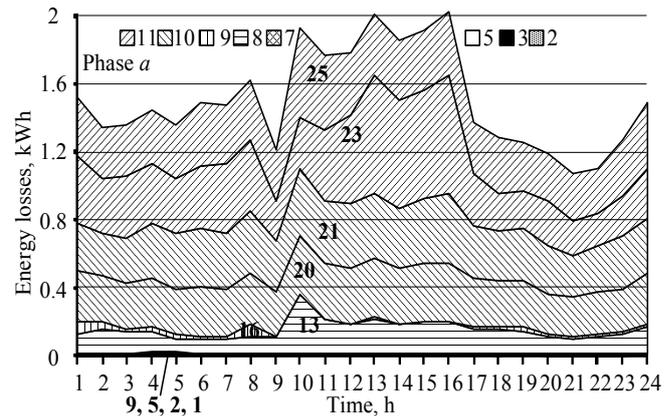


Fig. 12. Allocation of hourly energy losses in phases a, b, c between loads of the phase nodes and loads of houses connected to the phase, 3–11-phase nodes; 1–25-houses number

Рис. 12. Разнесение часовых потерь энергии в фазах a, b, c между нагрузками узлов и нагрузками домов, подключенных к фазе, 3–11 номера узлов; 1–25 номера домов

between phase wires and a neutral wire, between phase wires only, and between loads or individual consumers connected to phases of a distribution network.

A method for allocation of losses in a neutral wire between phase wires is proposed that allows substitution of four-wire representation of a network by a three-wire one during load flow and power losses computation.

The paper shows that losses computed directly based on readings of smart meters using total loads in the feeder nodes and loads of separate consumers are closer to losses determined using a balance meter than losses determined using the results of state estimation.

A new idea on the conditions for occurrence of negative losses in the feeder phases with imbalanced loads leading to reduction of total power

losses in them has been proposed. The cause of occurrence of higher losses in the feeder phase with minimum loads than in the phases with maximum loads that is due irregularly distributed loads has been investigated.

All the results obtained are exemplified by 40 slices of measurements taken from real protocols of a distribution network for different loads.

References

1. Bialek J. Topological generation and load distribution factors for supplement charge allocation in transmission open access. *IEEE Transactions on Power Systems*. 1997;12(3):1185-1193. <https://doi.org/10.1109/59.630460>.
2. Kirschen D., Allan R., Strbac G. Contributions of individual generators to loads and flows. In: *IEEE Transactions on Power Systems*. 1997;12(1):52-60. <https://doi.org/10.1109/59.574923>.
3. Gamm A.Z., Golub I.I., Grishin Y.A., Voitov O.N. A graph approach to determining the contribution factors of electric power supplies and losses. In: *Modern Electric Power System*. 11–13 September 2002, Wroslaw. Wroslaw; 2002, p. 215-220.
4. Conejo A.J., Arroyo J.M., Alguacil N., Guijarro A.L. Transmission loss allocation: a comparison of different practical algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2002;17(3):571-576. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.800894>.
5. Carpaneto E., Chicco G., Akilimali J.S. Computational aspects of the marginal loss allocation methods for distribution systems with distributed generation. In: *Mediterranean Electrotechnical Conference*. 16–19 May 2006, Malaga. Malaga; 2006, p. 1028-1031. <https://doi.org/10.1109/MELCON.2006.1653274>.
6. Carpaneto E., Chicco G., Akilimali J.S. Loss partitioning and loss allocation in three-phase radial distribution systems with distributed generation. In: *IEEE Transactions on Power Systems*. 2008;23(3):1039-1049. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.922228>.
7. Usman M., Coppo M., Bignucolo F., Turri R. Losses management strategies in active distribution networks: a review. *Electric Power Systems Research*. 2018;163(A):116-132. <http://doi.org/10.1016/j.epr.2018.06.005>.
8. Usman M., Coppo M., Bignucolo F., Turri R., Cerretti A. Multi-phase losses allocation method for active distribution networks based on branch current decomposition. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019;34(5):3605-3615. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2908075>.
9. Golub I.I., Boloev E.V., Kuzkina Y.I. Using smart meters for checking the topology and power flow calculation of a secondary distribution network. In: *E3S Web Conferences*. 2019;139:01059. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901059>.
10. Ciric R.M., Feltrin A.P., Ochoa L. F. Power flow in four-wire distribution networks-general approach. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2003;18(4):1283-1290. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.818597>.
11. Kuzkina Y.I., Golub I.I., Boloev E.V. State estimation of a three-phase four-wire secondary distribution network. *iPolytech Journal*. 2020;24(3):649-662. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-649-662>.
12. Golub I., Boloev E. Determination of losses in distribution networks by smart meter measurements. In: *International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering*. 2021. <https://doi.org/10.1109/ICECCE52056.2021.9514102>.
13. Khan Z.A., Jayaweera D., Gunduz H. Smart meter data taxonomy for demand side management in smart grids. *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*. 2016. <https://doi.org/10.1109/PMAPS.2016.7764143>.
14. Le Trong Nghia, Chin Wen-Long, Truong Dang Khoa, Nguyen Tran Hiep. Advanced metering infrastructure based on smart meters in smart grid. In: *Smart Metering Technology and Services - Inspirations for Energy Utilities*. London: InTechOpen; 2016, p. 37-61. <https://doi.org/10.5772/63631>.
15. Therrien F., Blakely L., Reno M.J. Assessment of measurement-based phase identification methods. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*. 2021;8:128-137. <https://doi.org/10.1109/OAJPE.2021.3067632>.
16. Kuzkina Y.I., Golub I.I. Identification of smart meter connection phases in low-voltage distribution network. *iPolytech Journal*. 2020;24(1):135-144. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-135-144>.
17. Boloev E.V., Golub I.I., Fedchishin V.V. low voltage distribution network state estimation based on smart meter readings. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(2):95-106. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-95-106>.
18. Golub I., Boloev E. Methods of linear and nonlinear state estimation of distribution network. *E3S Web Conferences*. 2018;58:03010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185803010>.
19. Golub I.I., Boloev E.V., Kuzkina Y.I. Method for Calculation of Load Flow in Secondary Distribution Network by Smart Meter Measurements. In: *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki = Methodological problems in reliability study of large energy systems*. Vol. 2. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the RAS; 2020, p. 123-133. (In Russ.).
20. Baptdanov L.N., Kozis V.L., Neklepaev B.N., Nechaev B.V., Okolovich M.N., Soldatkina L.A., et al. *Electrical networks and power plants*. Moscow: Gosenergoizdat; 1963, 464 p. (In Russ.).

Список источников

1. Bialek J. Topological generation and load distribution factors for supplement charge allocation in transmission open access // IEEE Transactions on Power Systems. 1997. Vol. 12. Iss. 3. P. 1185–1193. <https://doi.org/10.1109/59.630460>.
2. Kirschen D., Allan R., Strbac G. Contributions of individual generators to loads and flows // IEEE Transactions on Power Systems. 1997. Vol. 12. Iss. 1. P. 52–60. <https://doi.org/10.1109/59.574923>.
3. Gamm A.Z., Golub I.I., Grishin Y.A., Voitov O.N. A graph approach to determining the contribution factors of electric power supplies and losses // Modern Electric Power System (Wroslaw, 11–13 September 2002). Wroslaw, 2002. P. 215–220.
4. Conejo A.J., Arroyo J.M., Alguacil N., Guijarro A.L. Transmission loss allocation: a comparison of different practical algorithms // IEEE Transactions on Power Systems. 2002. Vol. 17. Iss. 3. P. 571–576. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.800894>.
5. Carpaneto E., Chicco G., Akilimali J.S. Computational aspects of the marginal loss allocation methods for distribution systems with distributed generation // Mediterranean Electrotechnical Conference (Malaga, 16–19 May 2006). Malaga, 2006. P. 1028–1031. <https://doi.org/10.1109/MELCON.2006.1653274>.
6. Carpaneto E., Chicco G., Akilimali J.S. Loss partitioning and loss allocation in three-phase radial distribution systems with distributed generation // IEEE Transactions on Power Systems. 2008. Vol. 23. Iss. 3. P. 1039–1049. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.922228>.
7. Usman M., Coppo M., Bignucolo F., Turri R. Losses management strategies in active distribution networks: a review // Electric Power Systems Research. 2018. Vol. 163. Part A. P. 116–132. <http://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.06.005>.
8. Usman M., Coppo M., Bignucolo F., Turri R., Cerretti A. Multi-phase losses allocation method for active distribution networks based on branch current decomposition // IEEE Transactions on Power Systems. 2019. Vol. 34. Iss. 5. P. 3605–3615. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2908075>.
9. Golub I.I., Boloev E.V., Kuzkina Y.I. Using smart meters for checking the topology and power flow calculation of a secondary distribution network // E3S Web Conferences. 2019. Vol. 139. P. 01059. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901059>.
10. Ciric R.M., Feltrin A.P., Ochoa L. F. Power flow in four-wire distribution networks-general approach // IEEE Transactions on Power Systems. 2003. Vol. 18. Iss. 4. P. 1283–1290. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.818597>.
11. Кузькина Я.И., Голуб И.И., Болоев Е.В. Оценивание состояния трехфазной четырехпроводной вторичной распределительной сети // iPolytech Journal. 2020. Т. 24. № 3. С. 649–662. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-649-662>.
12. Golub I., Boloev E. Determination of losses in distribution networks by smart meter measurements // International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering. 2021. <https://doi.org/10.1109/ICECCE52056.2021.9514102>.
13. Khan Z.A., Jayaweera D., Gunduz H. Smart meter data taxonomy for demand side management in smart grids // International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. 2016. <https://doi.org/10.1109/PMAPS.2016.7764143>.
14. Le Trong Nghia, Chin Wen-Long, Truong Dang Khoa, Nguyen Tran Hiep. Advanced metering infrastructure based on smart meters in smart grid // Smart Metering Technology and Services - Inspirations for Energy Utilities. London: InTechOpen, 2016. P. 37–61. <https://doi.org/10.5772/63631>.
15. Therrien F., Blakely L., Reno M.J. Assessment of measurement-based phase identification methods // IEEE Open Access Journal of Power and Energy. 2021. Vol. 8. P. 128–137. <https://doi.org/10.1109/OAJPE.2021.3067632>.
16. Кузькина Я.И., Голуб И.И. Идентификация фаз подключения интеллектуальных счетчиков в низковольтной распределительной сети // iPolytech Journal. 2020. Т. 24. № 1. С. 135–144. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-135-144>.
17. Болоев Е.В., Голуб И.И., Федчишин В.В. Оценивание состояния распределительной сети низкого напряжения по измерениям интеллектуальных счетчиков // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 95–106. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-95-106>.
18. Golub I., Boloev E. Methods of linear and nonlinear state estimation of distribution network // E3S Web Conferences. 2018. Vol. 58 P. 03010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185803010>.
19. Голуб И.И., Болоев Е.В., Кузькина Я.И. Метод расчета потокораспределения вторичной распределительной сети по измерениям интеллектуальных счетчиков // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. В 3-х кн. Кн. 2. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2020. С. 123–133.
20. Баптиданов Л.Н., Козис В.Л., Неклепаев Б.Н., Нечаев Б.В., Околович М.Н., Солдаткина Л.А. [и др.]. Электрические сети и станции. М.: Энергоиздат, 1963. 464 с.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yana I. Krupeneva,

First Category Engineer of the Design Sector,
Relay Protection and Automation Service,
EuroSibEnergo Engineering Center LLC,
67, Ryabikov Blvd., Irkutsk 664043, Russia;
Postgraduate Student, Melentiev Energy
Systems Institute SB RAS,

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крупенёва Яна Игоревна,

инженер 1 категории сектора проектирования,
Служба релейной защиты и автоматики,
ООО «Инженерный центр «ЕвроСибЭнерго»,
664043, г. Иркутск, бул. Рябикова, 67, Россия;
аспирант,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
yaigk@yandex.ru
✉ krupeneva_yi@ic-eurosib.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2538-3939>

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
yaigk@yandex.ru
✉ krupeneva_yi@ic-eurosib.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2538-3939>

Evgeniy V. Boloev,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
Associate Professor of the Department of
Electric Stations, Networks and Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
boloev@isem.irk.ru
ev.boloev@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-5913-2978>

Болоев Евгений Викторович,

к.т.н.,
старший научный сотрудник,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
доцент кафедры электрических станций,
сетей и систем,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
boloev@isem.irk.ru
ev.boloev@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-5913-2978>

Irina I. Golub,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Leading Researcher,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
Head of the Department of Energy Systems
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
golub@isem.irk.ru

Голуб Ирина Ивановна,

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
заведующий кафедрой электроэнергетических систем,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
golub@isem.irk.ru

Contribution of the authors

All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the article

The article was submitted 08.07.2023;
approved after reviewing 27.11.2023;
accepted for publication 30.11.2023.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 08.07.2023 г.;
одобрена после рецензирования 27.11.2023 г.;
принята к публикации 30.11.2023 г.

Научная статья

УДК 621.311.25

EDN: HNSEUI

DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-737-748

ЭНЕРГЕТИКА



Исследование работы солнечной электростанции с двухосевым солнечным трекером

С.В. Митрофанов^{1✉}, Д.К. Байкаменов²^{1,2}Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

Резюме. Цель – оценка выработки электрической энергии солнечной электростанцией, оснащенной системой слежения за Солнцем с помощью метода расчета солнечной инсоляции ASHRAE (чистого неба). Математический алгоритм реализован с помощью системы MathCad с выгрузкой и анализом данных в Microsoft Excel. Для достижения цели использовались данные о выработке электроэнергии за месяц и период эксплуатации в течение 2022–2023 гг. солнечными станциями с оптимальным неизменяющимся углом наклона солнечной панели и с системой слежения за Солнцем. Приведенный алгоритм расчета выработанной электроэнергии солнечной станцией, с учетом изменяющейся температуры окружающего воздуха, запыленности и пропускания солнечного света покрытием солнечной фотоэлектрической панели, позволил спрогнозировать выработку электроэнергии со средней абсолютной ошибкой от 0,22 до 9,8. С помощью специализированного программного обеспечения MathCad разработана математическая модель для определения солнечной инсоляции для произвольного дня и географических координат местности, на которой предполагается строительство солнечной электростанции. Приведенные экспериментальные и расчетные исследования для выбранных ясных дней, с учетом погодных условий, показали адекватность рассматриваемого метода и возможность его использования для прогнозирования выработки электроэнергии с различными углами наклона солнечной фотоэлектрической панели. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что солнечная станция с системой слежения за Солнцем выработала за год на 37% больше электроэнергии, чем станция с неподвижными солнечными панелями. Метод расчета солнечной инсоляции ASHRAE (чистого неба) позволяет оценить объем выработанной электроэнергии для произвольного региона с минимальными входными данными. В дальнейшем будет проведена работа по поиску и совершенствованию методов для прогнозирования выработки электроэнергии солнечной электростанцией в пасмурные дни.

Ключевые слова: инсоляция, солнечная электростанция, угол наклона, фотоэлектрическая панель, система слежения

Для цитирования: Митрофанов С.В., Байкаменов Д.К. Исследование работы солнечной электростанции с двухосевым солнечным трекером // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 737–748. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-737-748>. EDN: HNSEUI.

POWER ENGINEERING

Original article

Operation of a solar power plant with dual-axis solar tracker

Sergey V. Mitrofanov^{1✉}, Damir K. Baykasenov²^{1,2}Orenburg State University, Orenburg, Russia

Abstract. The paper evaluates the generation of electrical energy by a solar power plant equipped with a solar tracking system using the ASHRAE clear-sky method for calculating solar insolation. The mathematical algorithm uses the MathCad system with data export and analysis in Microsoft Excel. Collected over a month and the operation period in 2022–2023, data on electricity generation by solar stations characterised by an optimal constant angle of inclination of the solar panel and equipped with a solar tracking system were used. By taking into account the varying ambient temperature, dust content, and solar transmission by the solar panel coating, the given algorithm allowed electricity generation by a solar panel to be forecasted with an average absolute error ranging from 0.22 to 9.8. To determine solar insolation for a specific day and the geographical coordinates of the intended construction site of a solar power plant, a mathematical model was developed using MathCad software. The experimental and computational studies carried out on selected clear days,

© Митрофанов С.В., Байкаменов Д.К., 2023

accounting for varying weather conditions, demonstrated the adequacy of this method and its applicability for forecasting electricity generation with different inclination angles of a solar panel. It was established that a solar power plant with a solar tracking system generated 37% more electricity per year than that with fixed solar panels. The ASHRAE Clear-Sky method for calculating solar insolation allows the amount of electricity generated for a specific region to be estimated with minimal input data. Further research will focus on defining and improving methods for forecasting electricity generation by a solar power plant on overcast days.

Keywords: insolation, solar power plant, tilt angle, photovoltaic panel, tracking system

For citation: Mitrofanov S.V., Baykasenov D.K. Operation of a solar power plant with dual-axis solar tracker. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):737-748. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-737-748>. EDN: HNSEUI.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие возобновляемой энергетики (ВЭ) в России и мире позволит не только уменьшить углеродный след, но и обеспечит удаленным потребителям качественное и надежное энергоснабжение. По объему выработки солнечными электростанциями (СЭС) и ветроэлектростанциями (ВЭС) в общей выработке электроэнергии Россия занимает одно из последних мест в мире. Доля выработки электроэнергии такими электростанциями в общей доле всей вырабатываемой электроэнергии в России в 2022 г. составила всего 0,5%, но это в три раза больше, чем в 2019 г. По данным статистического ежегодника мировой энергетики³ [1], в 2022 г. доля выработки электроэнергии СЭС и ВЭС в общем объеме вырабатываемой электроэнергии в Португалии составила 34,8%, в Испании – 33,2%, Германии – 32,5%, в Нидерландах – 32,2%, в Великобритании – 29%. В мире наблюдается активный рост количества вновь вводимых в эксплуатацию СЭС. Это обусловлено снижением затрат на производство и установку энергетического оборудования для строительства таких станций. Согласно статистике, за последние десять лет объем строительства СЭС в мире вырос на 35%. За последние пять лет в России было введено в эксплуатацию более 1,5 ГВт СЭС, что в 3,5 раза больше всей ранее установленной мощности. Общая установленная мощность всех СЭС на 2022 г. составила 1,93 ГВт. По данным Всемирной ветроэнергетической ассоциации (WWEA), в 2022 г. произошло увеличение мощности ВЭС более чем на 88,6 ГВт. На сегодняшний день в мире общая мощность установленных ВЭС составляет более 934 ГВт. Страны, занимающие лидирующие позиции в выработке электроэнергии с помощью ВЭС и СЭС, – Испания, Португалия, Германия, Великобритания, Новая Зеландия, Нидерланды, Чили, Австралия, Италия, Бельгия, Швеция и

Турция. В России за последние четыре года произошло активное строительство крупных ВЭС, в эксплуатацию было введено около 600 МВт мощностей. Их общая установленная мощность на 2022 г. составила 713 МВт.

Оренбургская область не осталась в стороне от масштабных изменений, происходящих в ВЭ России. Начиная с 2017 г., в эксплуатацию было введено более 330 МВт мощностей СЭС, что составило около 20% всех СЭС в России. Это такие СЭС, как Сорочинская СЭС (СЭС Уран), Новосергиевская СЭС, СЭС «Нептун», Орская СЭС им. А.А. Влазнева, Чкаловская СЭС, Светлинская СЭС, Соль-Илецкая СЭС, Елшанская СЭС, Домбаровская СЭС, СЭС «Нептун-2», Грачевская СЭС, Плешановская СЭС, Григорьевская СЭС, Переволоцкая СЭС. На сегодняшний день в Оренбургской области действуют четыре ВЭС сравнительно небольшой мощности: Тамар-Уткульская (2,725 МВт), Орская (650 кВт), «Вишневые горки» (400 кВт) и «Самородово» (200 кВт). Ведутся работы по проектированию новых ВЭС и определяются места их расположения. Перспективным является размещение новых ВЭС в предгорьях Южного Урала (г. Кувандык, г. Медногорск, ст. Сара) и восточном Оренбуржье (г. Орск).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для дальнейшего развития ВЭ в России необходимо идти по пути повышения энергетической эффективности построенных или вновь проектируемых СЭС и ВЭС. Такой подход позволит уменьшить сроки окупаемости и увеличить инвестиции в проекты ВЭ. Основными направлениями повышения надежности, экономичности и энергоэффективности являются:

- продолжение политики поддержки государством производителей оборудования для строительства объектов ВЭ;
- развитие строительства заводов по выпуску комплектующих для объектов ВЭ для

³Статистический справочник мировой энергетики [Электронный ресурс]. URL: <https://yearbook.enerdata.ru> (23.04.2023).

100% локализации производства на территории России;

- снижение затрат на производство комплектующих и сопутствующих изделий, необходимых для строительства станций ВЭ;
- повышение КПД преобразователей напряжения, установленных на объектах ВЭ;
- повышение энергетической эффективности уже построенных объектов ВЭ.

В данной работе рассмотрено направление, касающееся повышения энергетической эффективности СЭС. Один из способов повышения энергетической эффективности СЭС – это оснащение СЭС поворотными системами, следящими за Солнцем в автоматическом режиме, в том числе с помощью математических алгоритмов, заложенных в систему управления. Оценивая такой способ, необходимо учитывать и экономичность такой системы, чтобы установленная система не увеличивала срок окупаемости солнечной станции. В данной работе рассмотрен именно такой способ повышения энергетической эффективности работы СЭС.

Выходная мощность фотоэлектрической панели (ФЭП) зависит от погодных условий и времени суток, поскольку солнечное излучение имеет разное значение в течение всего светового дня. Из-за меняющихся погодных условий и внезапного затенения облаками ФЭП считаются нелинейными системами. Система слежения за Солнцем контролирует положение ФЭП и поддерживает ее под углом, обеспечивающим наилучшую выходную мощность. Для эффективного отслеживания Солнца учеными было разработано несколько принципов и способов слежения за Солнцем. В основе разработки систем слежения за Солнцем лежит поворотная платформа, на которой расположена ФЭП [2]. В мире ведутся работы по получению максимально возможной мощности от СЭС в течение всего светового дня. Эти работы развиваются по нескольким направлениям. Первое – разработка следящих систем за Солнцем на основе поиска точки максимальной мощности СЭС. Оно отражено в работах [3–6]. Данный способ основан на поиске максимальной вырабатываемой мощности ФЭП путем сравнения значения вырабатываемой мощности в текущий и предыдущий периоды времени и передачи сигнала от микроконтроллера на поворот ФЭП исполнительным механизмам, поворачи-

вающим платформу с ФЭП под нужным углом к Солнцу. Таким образом, достигается максимально вырабатываемая мощность СЭС. Основная задача – это минимизация числа колебаний следящей системы при поиске точки максимальной мощности. Недостатком такой системы является увеличение потребляемой мощности следящей системы при поиске точки максимальной мощности в момент затенения ФЭП облаками. Второе направление – разработка одно- или двухосевых солнечных трекеров, работающих на основе непосредственного измерения солнечной инсоляции путем отдельных фотоэлементов или фоторезисторов, установленных непосредственно на ФЭП. Это направление разработок отражено в работах [7–12]. Принцип работы сформирован на получении и обработке информации, получаемой с фотоэлементов или фоторезисторов. По полученным сведениям, осуществляется ориентация ФЭП на Солнце. В данной работе выполнены теоретические и экспериментальные исследования СЭС с двухосевой системой слежения за Солнцем, построенной на основе фоторезисторов.

Проектирование устройств слежения за Солнцем для увеличения электрической энергии, вырабатываемой СЭС, является актуальной задачей. При этом самыми эффективными системами слежения за Солнцем являются системы с дублированием. Они имеют возможность измерения солнечной инсоляции и встроенный математический алгоритм для корректировки угла наклона ФЭП в момент затенения ее облаками. Для использования математического аппарата в системах проектирования СЭС с трекерами требуются разработка имитационных моделей и проведение экспериментальных исследований на физических моделях. Имитационные модели позволяют не только разработать эффективные алгоритмы управления системой слежения за Солнцем путем вычисления оптимального угла наклона ФЭП, но и получить предварительные данные о вырабатываемой электроэнергии и сроках окупаемости. Целью исследования является обоснование применения расчетного математического метода для прогнозирования объема вырабатываемой энергии СЭС с одно- или двухосевой системой слежения за Солнцем.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из исходных параметров для расчетов является солнечная инсоляция, получаемая ФЭП в течение всего светового дня с учетом входящих в нее составляющих. Вырабатываемая мощность ФЭП, согласно [13], определяется по формуле:

$$P = N \cdot f \cdot P_n \frac{G_\beta}{G_n} [1 - \sigma (T - T_{25^\circ\text{C}})], \quad (1)$$

где N – число фотоэлектрических панелей в СМ; f – коэффициент, описывающий снижение выходной мощности ФЭП из-за деградации и загрязнения (принимается равным 0,9 согласно [13]), о.е.; P_n – номинальная мощность одной ФЭП, Вт; G_β – фактическая солнечная инсоляция в месте установки СЭС, Вт·ч/м²; G_n – номинальная солнечная инсоляция, принимаемая за 1 кВт·ч/м²; σ – температурный коэффициент (по данным завода-изготовителя ФЭП), %/°С; T – рабочая температура поверхности ячейки ФЭП, °С; $T_{25^\circ\text{C}}$ – стандартная температура ФЭП, обычно принимаемая равной 25°С [14].

Рабочая температура поверхности ячейки ФЭП может быть найдена, согласно [15], по формуле:

$$T = T_a + \frac{G_\beta}{800} (T_n - T_{20^\circ\text{C}}) \left(1 - \frac{\eta}{\tau}\right), \quad (2)$$

где T_a – температура окружающей среды, °С; T_n – номинальная рабочая температура ФЭП (по данным завода-изготовителя), °С; $T_{20^\circ\text{C}}$ – температура окружающей среды, при которой определяется номинальная рабочая температура, принимается согласно [15] равной 20°С; η – коэффициент полезного действия ФЭП (по данным завода-изготовителя) в о.е.; τ – коэффициент пропускания солнечного света покрытием над ФЭП (согласно [16] принимается равным 0,9).

Рассмотрим произвольное положение ФЭП в пространстве, изображенное на рис. 1. Ориентация ФЭП выполняется по двум осям – по углу наклона к горизонтальной поверхности β и по азимутальному углу γ относительно перпендикуляра к поверхности ФЭП (на рис. 1 – вектора PV). Угол θ – угол между падающими лучами Солнца и вектором-перпендикуляром PV к поверхности ФЭП (угол падения). При правильной ориентации ФЭП на Солнце угол наклона ФЭП β будет равен зенитному углу θ_z ,

а азимутальный угол γ будет равен солнечному азимутальному углу γ_s . Углы θ_z , γ_s можно определить по методике, изложенной в [25] для произвольного номера дня в году i и времени суток t_k .

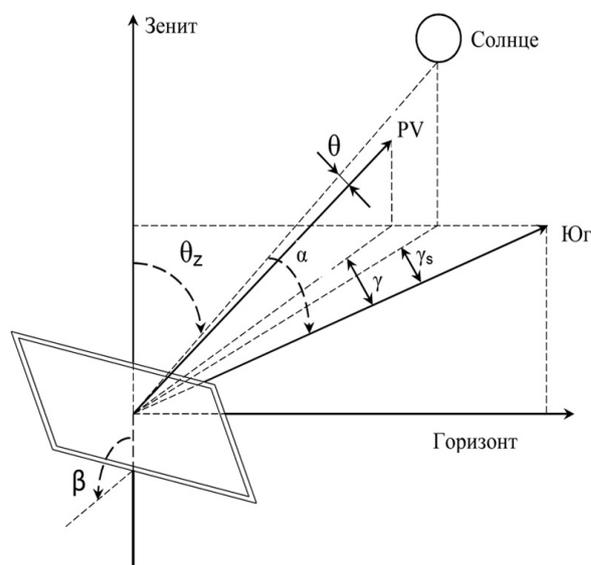


Рис. 1. Схематическое расположение фотоэлектрической панели в пространстве
 Fig. 1. Schematic arrangement of the photovoltaic panel in space

Фактическая солнечная инсоляция G_β в формулах (1) и (2) изменяется в зависимости от положения Солнца на небе, времени суток, погодных условий, географического региона [10, 17, 18].

При проектировании, внедрении и установке систем слежения за Солнцем необходимо учитывать несколько параметров солнечной энергии для прогнозирования вырабатываемой электроэнергии. Лучи внеземного солнечного излучения проникают через атмосферу Земли и поглощаются молекулами воздуха, некоторые из них рассеиваются. Установлено, что в день ясного неба около 70% глобальной солнечной радиации приходится на прямое солнечное излучение [18]. Ослабление солнечного луча из-за пыли, загрязнения воздуха, водяного пара, облаков и мутности можно смоделировать. Было предпринято много попыток смоделировать это затухание в зависимости от номера дня. Одной из таких моделей является модель ASHRAE (чистого неба), используемая в работах [19, 20], предложенная Б.Ю.Х. Лю и Р.К. Джордан [21, 22] и частично примененная в [23, 24]. Метод чистого неба

²Безруких П.П., Безруких П.П. (мл.), Грибков С.В. Ветроэнергетика: справ.-метод. издание / под общ. ред. П.П. Безруких. М.: ИнтехэнергоИздат; Теплоэнергетик, 2014. 304 с.

является простым и надежным методом для математической реализации, требует минимального объема исходных данных. Он подходит для прогнозирования выработки электроэнергии СЭС в ясные дни.

Фактическая солнечная инсоляция G_{β} , для произвольного номера дня в году i и произвольного времени суток t_k светового дня, падающая на наклонную поверхность, может быть найдена по формуле [19]:

$$G_{\beta(i,k)} = G_{b(i,k)} R_{b(i,k)} f(\theta) + G_{d(i,k)} R_{d(i,k)} + G_{r(i,k)} R_{r(i,k)}, \quad (3)$$

где $G_{b(i,k)}$ – прямое солнечное излучение, падающее на горизонтальную поверхность ФЭП, Вт·ч/м²; $G_{d(i,k)}$ – рассеянное солнечное излучение, падающее на горизонтальную поверхность ФЭП, Вт·ч/м²; $G_{r(i,k)}$ – отраженное солнечное излучение, Вт·ч/м²; $R_{b(i,k)}$ – отношение прямого солнечного излучения на наклонной поверхности к прямому солнечному излучению на горизонтальной поверхности ФЭП; $R_{d(i,k)}$ – отношение рассеянного солнечного излучения на наклонной поверхности к рассеянному солнечному излучению на горизонтальной поверхности ФЭП; $R_{r(i,k)}$ – коэффициент отраженной солнечной энергии на наклонную поверхность ФЭП; $f(\theta)$ – управляющая функция, принимает значение 1, если $\cos(\theta) \geq 0$ или 0, в противном случае это означает, что прямое солнечное излучение на поверхность ФЭП не попадает в данный момент времени.

Индексы в формуле (3) представлены для удобства представления зависимости величин, участвующих в расчетах, от номера дня в году i и времени суток t_k .

Прямое солнечное излучение, падающее на горизонтальную поверхность, определяется [19] как

$$G_{b(i,k)} = G_{bn(i,k)} \sin(\alpha_{(i,k)}), \quad (4)$$

где $G_{bn(i,k)}$ – прямое солнечное излучение, достигающее поверхности Земли, Вт·ч/м²; $\alpha_{(i,k)}$ – угол солнечной высоты, т.е. угол между горизонтальной поверхностью Земли и линией, направленной к Солнцу.

Согласно рассматриваемой модели ASHRAE [19], прямое солнечное излучение, достигающее поверхности Земли, может быть выражено как

$$G_{bn(i,k)} = A_i e^{\left(\frac{-K_i}{\sin(\alpha_{(i,k)})}\right)}, \quad (5)$$

где A_i – видимый внеземной поток солнечного излучения, Вт·ч/м²; K_i – оптическая глубина, о.е.

Видимый внеземной поток солнечного излучения может быть определен как

$$A_i = 1160 + \left[75 \sin\left(\frac{360}{365}(i - 275)\right) \right], \quad (6)$$

Оптическая глубина:

$$K_i = 0,174 + \left[0,035 \sin\left(\frac{360}{365}(i - 100)\right) \right], \quad (7)$$

Угол солнечной высоты находится, согласно [25], по формуле:

$$\alpha_{(i,k)} = \arcsin(\sin(\delta_i) \sin(\varphi) + \cos(\delta_i) \cos(\varphi) \cos(\omega_{(i,k)})), \quad (8)$$

где δ_i – склонение Солнца, в зависимости от номера дня i , рад; φ – широта местности, рад; $\omega_{(i,k)}$ – часовой угол, в зависимости от номера дня i и времени суток t_k , рад.

Величины δ_i , $\omega_{(i,k)}$, входящие в формулу (8), могут быть определены по известным формулам для произвольного дня и времени суток по [25].

Расчет рассеянного излучения, падающего на горизонтальную поверхность ФЭП, является более сложным по сравнению с расчетом прямого солнечного излучения. Получаемое ФЭП солнечное излучение может рассеиваться от атмосферных частиц и водяного пара, а также отражаться облаками. Некоторое излучение отражается от поверхности в небо и снова рассеивается обратно на Землю. Простейшие модели рассеянного излучения предполагают, что оно поступает на объект с одинаковой интенсивностью со всех направлений, то есть небо считается изотропным. Рассеянное солнечное излучение, согласно [19], можно записать как

$$G_{d(i,k)} = 0,095 + \left[0,04 \sin\left[\frac{360}{365}(i - 100)\right] \right] G_{bn(i,k)}. \quad (9)$$

Отраженное от поверхности Земли солнечное излучение на наклонную поверхность ФЭП можно определить как

$$G_{r(i,k)} = \rho (G_{b(i,k)} + G_{d(i,k)}), \quad (10)$$

где ρ – альbedo земной поверхности, в данном исследовании принимаем среднее значение 0,3 [19].

Отношение прямого солнечного излучения на наклонной поверхности к прямому солнечному излучению на горизонтальной поверхности ФЭП, согласно [19, 20]:

$$R_{b(i,k)} = \frac{\cos(\varphi - \beta_{i,k}) \cos(\delta_i) \sin(\omega_{s(i)}) + \omega_{s(i)} \sin(\varphi - \beta_{i,k}) \sin(\delta_i)}{\cos(\varphi) \cos(\delta_i) \sin(\omega_{s(i)}) + \omega_{s(i)} \sin(\varphi) \sin(\delta_i)} \quad (11)$$

где $\beta_{i,k}$ – угол наклона ФЭП в произвольный момент времени; $\omega_{s(i)}$ – часовой угол захода Солнца для произвольного дня, определяется по [25].

Отношение рассеянного солнечного излучения на наклонной поверхности к рассеянному солнечному излучению на горизонтальной поверхности ФЭП, согласно [19]:

$$R_{d(i,k)} = \frac{1 + \cos(\beta_{i,k})}{2}. \quad (12)$$

Коэффициент отраженной солнечной энергии на наклонной поверхности ФЭП, согласно [19]:

$$R_{r(i,k)} = \frac{1 - \cos(\beta_{i,k})}{2}. \quad (13)$$

В общем случае угол между вектором PV и лучами Солнца может быть найден, согласно [10, 18, 25], как

$$\theta_{(i,k)} = \cos(\theta_{z(i,k)}) \cos(\beta_{(i,k)}) + \sin(\theta_{z(i,k)}) \sin(\beta_{(i,k)}) \cos(\gamma_{s(i,k)} - \gamma_{(i,k)}). \quad (14)$$

В случае правильной ориентации на Солнце угол наклона ФЭП $\beta_{(i,k)} = \theta_{z(i,k)}$, а азимутальный угол ФЭП $\gamma_{s(i,k)} = \gamma_{(i,k)}$, тогда угол θ будет равен 0. Все остальные случаи расположения ФЭП в пространстве станут считаться общими и могут быть учтены в расчетных формулах, приведенных выше.

В Оренбургском государственном университете ведутся работы по направлению развития систем слежения за Солнцем и их адаптации к реальным климатическим условиям. На крыше одного из учебных корпусов университета расположена учебно-научная СЭС общей мощностью 800 Вт. Она была запущена в опытную эксплуатацию в фев-

рале 2022 г. с новой (по сравнению с действующей ранее) автоматизированной системой мониторинга, рассмотренной в [8]. СЭС состоит из двух автономных частей. Две ФЭП общей мощностью 400 Вт расположены на подвижной платформе с возможностью слежения за Солнцем, а две другие ФЭП, идентичные первым, расположены неподвижно под оптимальным углом 52° (угол наклона ФЭП равен углу широты местности, в которой установлена СЭС). Этот угол был выбран на основании математических исследований, представленных в [26], для исследуемого региона. Платформа, на которой расположены ФЭП, перемещаются с помощью двух линейных актуаторов, запитанных от сети переменного тока через источник постоянного тока. С целью экономии электроэнергии поворот платформы по зенитному углу выполняется один раз в час, а по углу склонения – один раз в три часа.

На рис. 2 показан общий вид экспериментальной СЭС и электрический щит подключения ее к системе внутреннего электроснабжения учебного корпуса. Подключение СЭС выполнено через сетевые инверторы, которые имеют возможность мониторинга и архивации данных с интервалом в одну минуту. В месте установки СЭС установлена метеостанция, которая ведет измерение и архивацию показаний солнечной инсоляции, температуры воздуха, влажности воздуха, атмосферного давления, скорости ветра и других метеорологических параметров с интервалом в одну минуту. На рис. 3 показана принципиальная схема сетевой фотоэлектрической станции с системой слежения за Солнцем.



Рис. 2. Экспериментальная учебно-научная солнечная электростанция
Fig. 2. Experimental training and scientific solar power plant

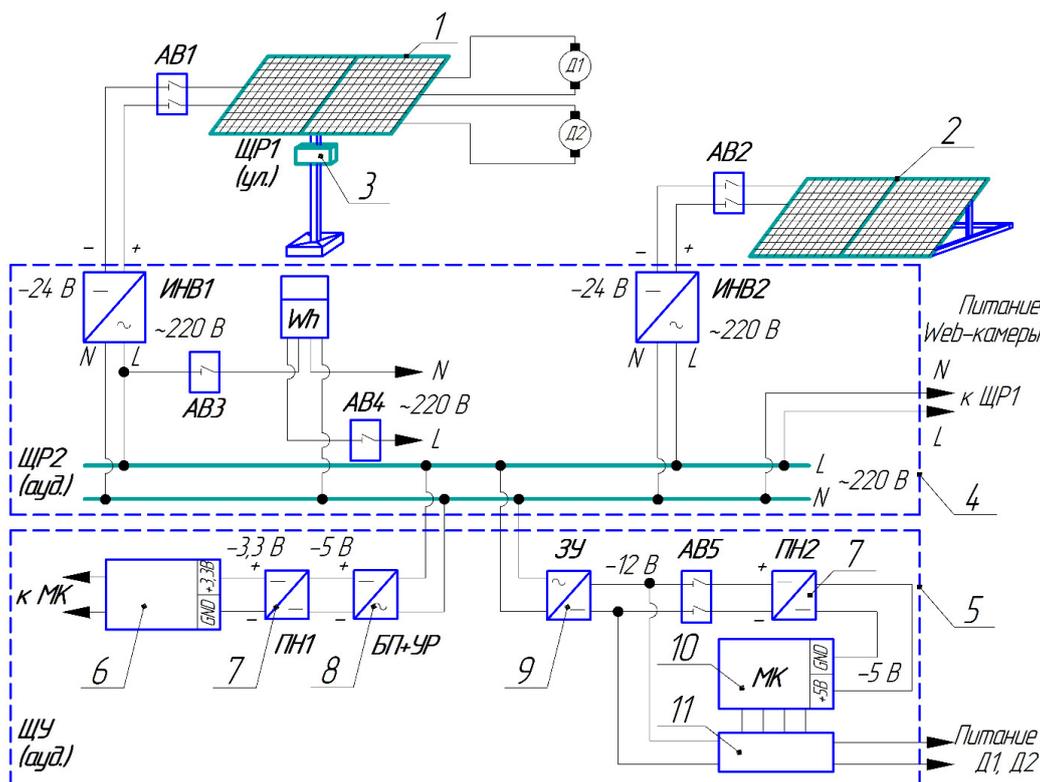


Рис. 3. Принципиальная схема сетевой фотоэлектрической станции с системой слежения за Солнцем (1 – фотоэлектрические панели с системой слежения за Солнцем (400 Вт); 2 – стационарные фотоэлектрические панели (400 Вт); 3 – распределительный щит № 1, установленный на мачте фотоэлектрической панели с системой слежения (на крыше здания); 4 – лабораторный распределительный щит № 2 с силовым оборудованием фотоэлектрической панели; 5 – лабораторный щит системы управления; 6 – WiFi модуль; 7 – преобразователь напряжения; 8 – блок питания и умная WiFi розетка; 9 – зарядное устройство; 10 – микроконтроллер; 11 – драйвер двигателей постоянного тока)
Fig. 3. Schematic diagram of a grid-connected photovoltaic power plant with a solar tracking system (1 – photovoltaic panels with a solar tracking system (400 W); 2 – stationary photovoltaic panels (400 W); 3 – distribution board no.1 installed on the mast of the photovoltaic panel with the tracking system (on the roof of the building); 4 – laboratory distribution board no.2 with photovoltaic panel power equipment; 5 – laboratory board of the control system; 6 – Wi-Fi module; 7 – voltage converter; 8 – power supply and a smart Wi-Fi socket; 9 – charger; 10 – microcontroller; 11 – DC motor driver)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проверки адекватности представленной математической модели и применимости ее к рассматриваемой местности (г. Оренбург) были выполнены расчетные и экспериментальные исследования.

Начиная с февраля 2022 г., ведется сбор информации с построенной учебно-научной солнечной станции и установленной метеостанции. На рис. 4 показана диаграмма выработки электроэнергии за апрель 2023 г. Из рис. 4 видно, что солнечная станция с системой слежения за Солнцем произвела на 40% больше электроэнергии, чем станция, имеющая стационарные ФЭП. Выработанная электроэнергия СЭС с системой слежения за Солнцем показана за вычетом потребления линейных актуаторов.

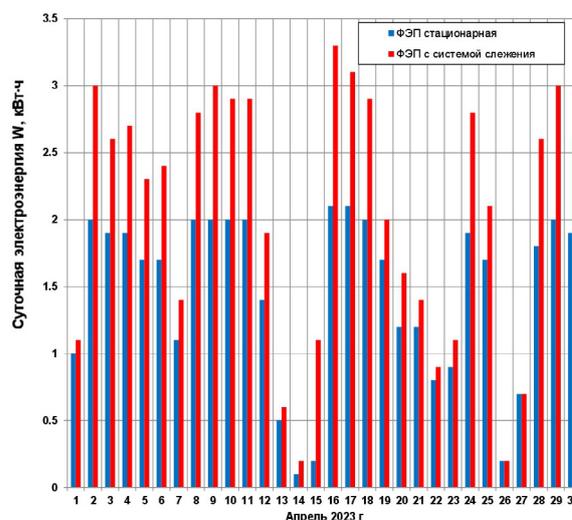


Рис. 4. Электрическая энергия, полученная учебно-научной солнечной электростанцией за апрель 2023 г.
Fig. 4. Electrical energy produced by the training and scientific solar power plant in April 2023

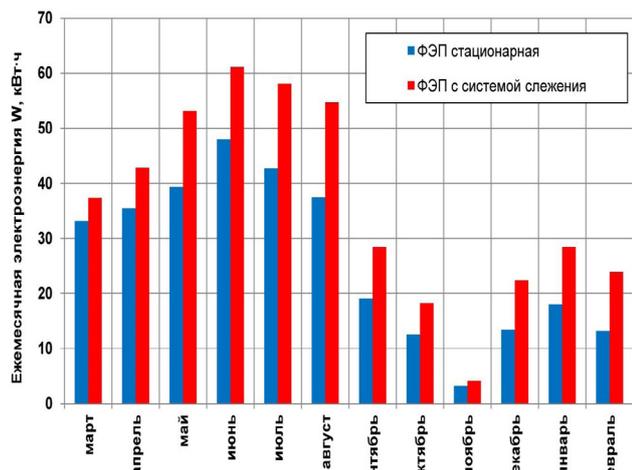


Рис. 5. Электрическая энергия, полученная учебно-научной солнечной электростанцией в течение марта 2022 – февраля 2023 г.

Fig. 5. Electrical energy produced by the training and scientific solar power plant for the period from March 2022 to February 2023

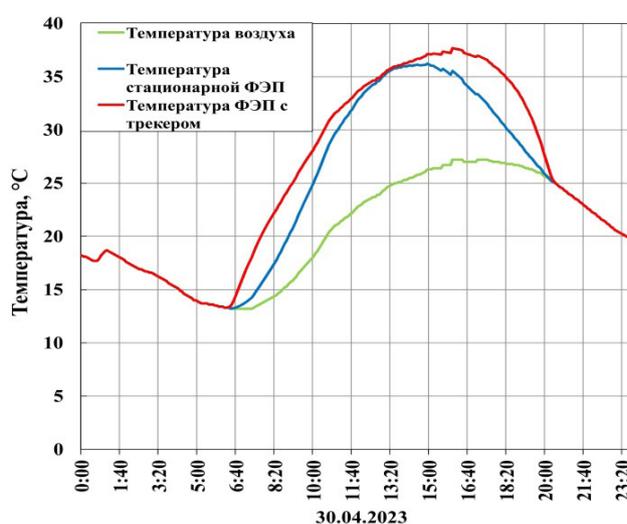
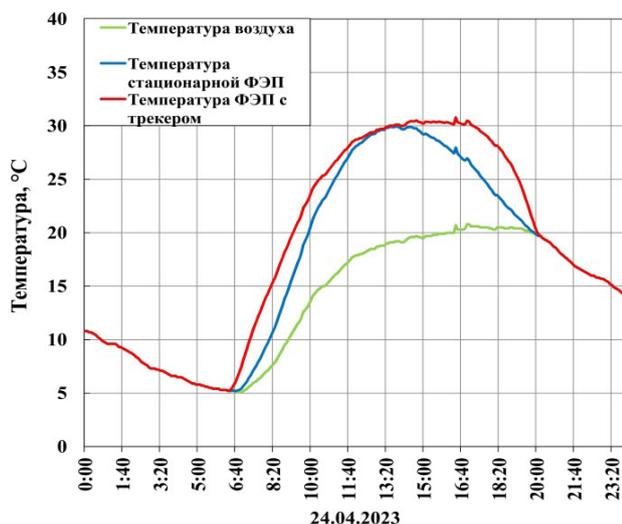
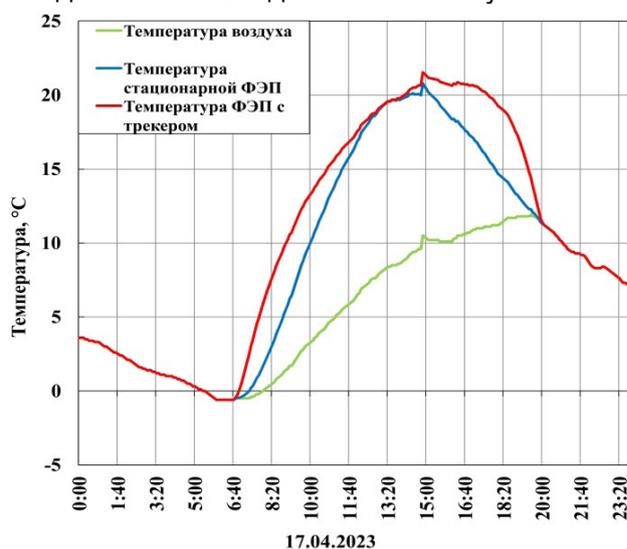
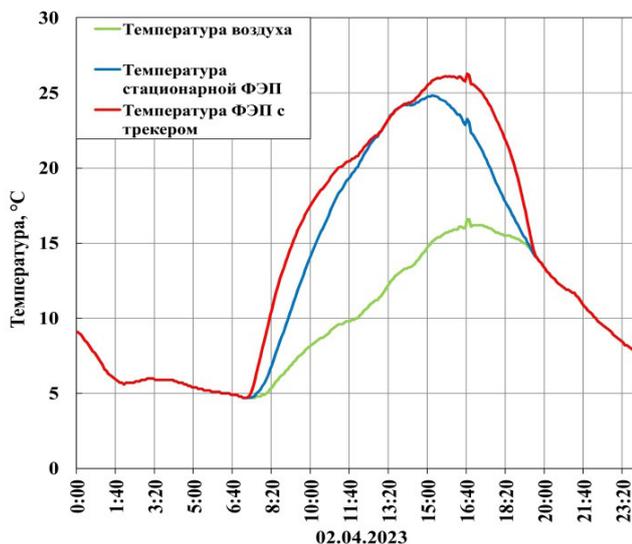


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные данные о температуре окружающего воздуха и поверхности фотоэлектрических панелей в рассматриваемые дни
Fig. 6. Calculated and experimental data on the temperature of the ambient air and the photovoltaic panel surface on the days under consideration

На рис. 5 показана диаграмма выработки электроэнергии в период, начиная с марта 2022 по февраль 2023 г. Годовой прирост вырабатываемой электроэнергии за счет установленной системы слежения составил в среднем 37%. Выполнив анализ выработки электроэнергии в течение всего года, можно сделать вывод о том, что максимальный прирост отмечен в апреле, так как среднесуточные температуры окружающей среды еще относительно невысоки.

Для проверки адекватности представленной математической модели в результате изучения погодных условий и полученных данных выбраны ясные солнечные дни в апреле 2023 г. Такими датами являются 02.04.2023 г., 17.04.2023 г., 24.04.2023 г. и 30.04.2023 г. Расчеты вырабатываемой мощности учебно-научной СЭС выполнялись по формулам (1)–(14) для подвижной и неподвижной ФЭП с учетом тем-

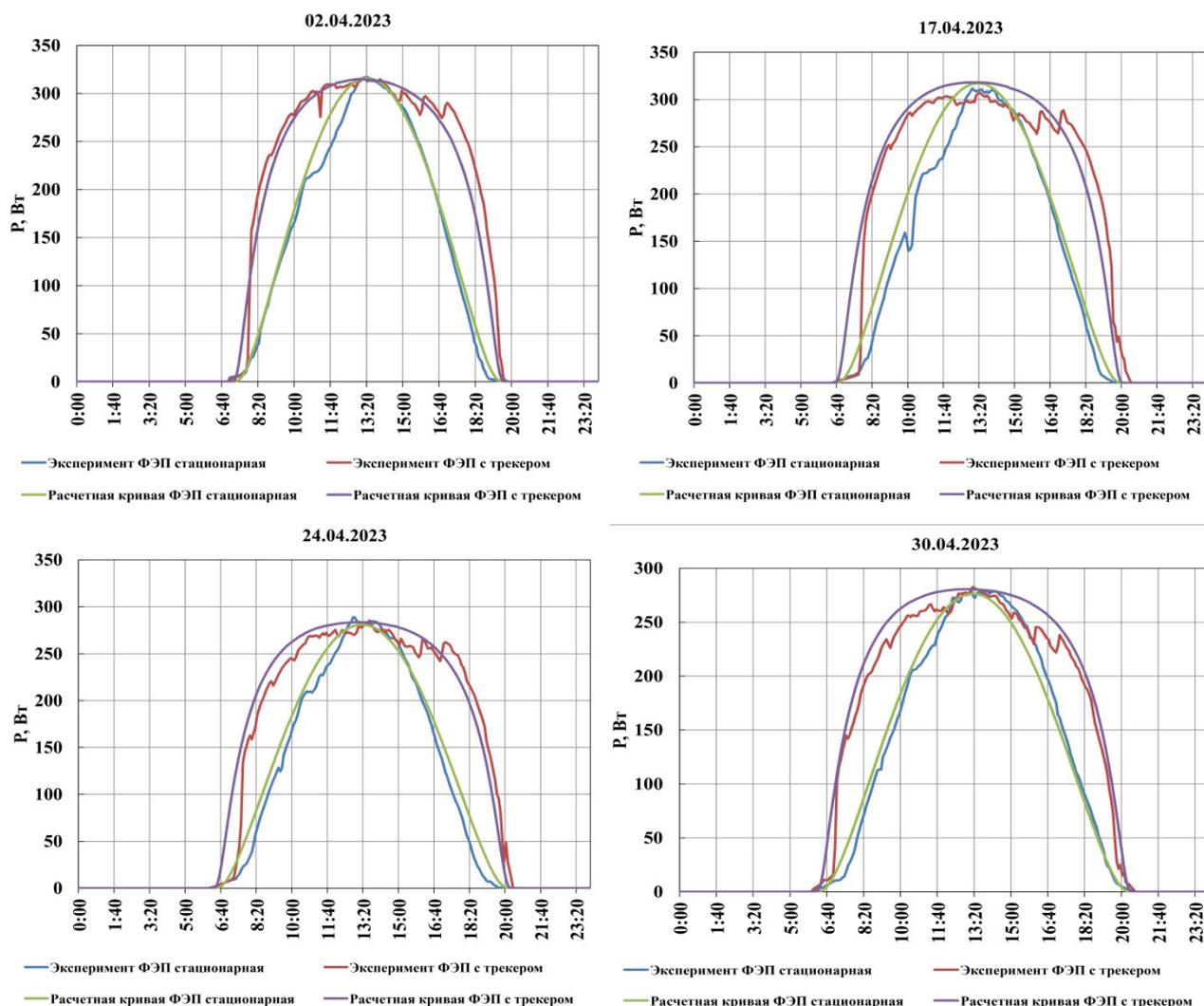


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные кривые, полученные с помощью математической и физической моделей солнечной электростанции
Fig. 7. Calculated and experimental curves obtained using mathematical and physical models of a solar power plant

температуры их поверхности. Температуры окружающей среды и поверхностей исследуемых ФЭП представлены на рис. 6. Из рис. 7 видно, что температура поверхностей исследуемых ФЭП разная в течение практически всего светового дня, за исключением времени солнцестояния. В представленной математической модели учтен этот факт, что позволило снизить погрешность расчета.

На рис. 7 показаны расчетные и экспериментальные зависимости вырабатываемой

мощности от времени суток в рассматриваемые дни.

В таблице приведены результаты расчета средней абсолютной ошибки (MAE) для рассматриваемых дней.

Хорошая точность приведенной методики расчета позволяет спрогнозировать выработку электроэнергии солнечными электростанциями и принять решение об их строительстве на местности с привязкой к конкретным географическим координатам.

Средняя абсолютная ошибка
Average absolute error

Дата	Стационарная ФЭП	ФЭП с трекером
02.04.2023 г.	4,01	5,07
17.04.2023 г.	9,8	4,96
24.04.2023 г.	6,56	4,74
30.04.2023 г.	0,22	9,23

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования выполнены с помощью экспериментальной учебно-научной солнечной станции, которая имеет систему непрерывного мониторинга и систему слежения за Солнцем. Станция позволила проверить адекватность метода расчета солнечной инсоляции ASHRAE (чистого неба) с учетом реальной температуры подвижной и неподвижной ФЭП. В работе показано, что метод расчета солнечной инсоляции подходит для предварительной оценки объема выработанной солнечными панелями электроэнергии, находящимися под произвольным углом относительно горизонтальной поверхности Земли и азимута. Этот метод хорошо работает в ясные солнечные дни. Выполненные экспериментальные исследования подтверждают адекватность представленной математической модели,

которую можно использовать для оценки потенциала солнечной энергии для всей территории России в ясные солнечные дни. Для территорий, находящихся за Полярным кругом, при расчетах следует учитывать полярный день и полярную ночь.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что солнечная станция, оснащенная системой слежения за Солнцем, вырабатывает за год на 37% электроэнергии больше, чем станция, солнечные панели которой расположены под оптимальным неизменяющимся углом. Применение подобных систем слежения за Солнцем оправданы несмотря на капитальные и эксплуатационные затраты. В работе показано, что разработка экономичных и надежных систем слежения за Солнцем является актуальной задачей на сегодняшний день.

Список источников

1. Безруких П.П. Тенденции развития электроэнергетики мира в XXI веке // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2022. № 3. С. 43–52. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-3-43-52>. EDN: RSVNKW.
2. Обухов С.Г., Плотников И.А. Выбор параметров и анализ эффективности применения систем слежения за солнцем // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 10. С. 95–106. <https://doi.org/10.18799/24131830/2018/10/2109>. EDN YNVYDZ.
3. Aguila-Leon J., Vargas-Salgado C., Chiñas-Palacios C.D., Díaz-Bello D. Solar photovoltaic maximum power point tracking controller optimization using grey wolf optimizer: a performance comparison between bio-inspired and traditional algorithms // Expert Systems With Applications. 2023. Vol. 211. Iss. 5. P. 118700. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118700>.
4. Hanzaei S.H., Gorji S.A., Ektesabi M. A scheme-based Review of MPPT techniques with respect to input variables including solar irradiance and pv arrays' temperature // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 182229–182239. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028580>.
5. Dhawan A., Malik O.P., Kumar R. Solar tracker implementation using MATLAB/SIMULINK // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. 2018. Vol. 5. Iss. 5. P. 178–189.
6. Мухамбедьяров Б.Б., Лукичев Д.В., Полюга Н.Л. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1099–1107. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-6-1099-1107>.
7. AL-Rousan N., Isa N.A.M., Desa M.K.M. Advances in solar photovoltaic tracking systems: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. Vol. 82. Iss. 1. P. 2548–2569. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.077>.
8. Митрофанов С.В., Немальцев А.Ю., Байкасенов Д.К. Первичная апробация автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера в климатических условиях Оренбургской области как перспектива создания программно-аппаратного комплекса // Альтернативная энергетика и экология. 2018. № 7-9. С. 43–54. <https://doi.org/10.15518/isaee.2018.07-09.043-054>.
9. Hafez A.Z., Yousef A.M., Harag N.M. Solar tracking systems: technologies and trackers drive types – a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 91. P. 754–782. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.094>.
10. Batayneh W., Bataineh A., Soliman I., Hafees S.A. Investigation of a single-axis discrete solar tracking system for reduced actuations and maximum energy collection // Automation in Construction. 2019. Vol. 98. P. 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.011>.
11. Bahrami A., Okoye C.O., Atikol U. The effect of latitude on the performance of different solar trackers in Europe and Africa // Applied Energy. 2016. Vol. 177. P. 896–906. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.103>.
12. De Sá Campos M.H., Tiba C. npTrack: a n-position single axis solar tracker model for optimized energy collection // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 4. P. 925. <https://doi.org/10.3390/en14040925>.
13. Fodhil F., Hamidat A., Nadjemi O. Potential, optimization and sensitivity analysis of photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system for rural electrification in Algeria // Energy. 2019. Vol. 169. P. 613–624. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.049>.
14. Abdelshafy A.M., Hassan H., Jurasz J. Optimal design of a grid-connected desalination plant powered by renewable energy resources using a hybrid PSO–GWO approach // Energy Conversion and Management. 2018. Vol. 173. P. 331–347. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.083>.
15. Brandoni C., Renzi M. Optimal sizing of hybrid solar micro-CHP systems for the household sector // Applied Thermal

- Engineering. 2015. Vol. 75. P. 896–907. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.023>.
16. Mattei M., Notton G., Cristofari C., Muselli M., Poggi P. Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance // *Renewable Energy*. 2006. Vol. 31. Iss. 4. P. 553–567. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.03.010>.
17. Bahrami A., Okoye C.O., Atikol U. Technical and economic assessment of fixed, single and dual-axis tracking PV panels in low latitude countries // *Renewable Energy*. 2017. Vol. 113. P. 563–579. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.095>.
18. Bakhshi-Jafarabadi R., Sadeh J. A comprehensive economic analysis method for selecting the PV array structure in grid-connected photovoltaic systems // *Renewable Energy*. 2016. Vol. 94. P. 524–536. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.091>.
19. Khatib T., Deria R. East-west oriented photovoltaic power systems: model, benefits and technical evaluation // *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 266. Iss. 15. P. 115810. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115810>.
20. Yadav A.K., Chandel S.S. Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 23. P. 503–513. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.027>.
21. Liu B.Y.H., Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted toward the equator // *ASHRAE Transactions*. 1962, Vol. 67. P. 526–541.
22. Liu B.Y.H., Jordan R.C. The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors // *Solar Energy*. 1963. Vol. 7. Iss. 2. P. 53–74. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(63\)90006-9](https://doi.org/10.1016/0038-092x(63)90006-9).
23. Обухов С.Г., Плотноков И.А. Математическая модель прихода солнечной радиации на произвольно-ориентированную поверхность для любого региона России // *Альтернативная энергетика и экология*. 2017. № 16-18. С. 43–56. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.16-18.043-056>. EDN: ZEJFDD.
24. Коновалов Ю.В., Хазиев А.Н. Расчет инсоляции солнечной фотоэлектрической электростанции с учетом геолокационных и погодных параметров // *iPolytech Journal*. 2022. Т. 26. № 3. С. 439–450. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-439-450>. EDN: CQEYQC.
25. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar engineering of thermal processes*. Madison, Wisconsin: John Wiley & Sons, 2013. P. 770–781.
26. Митрофанов С.В. Выбор оптимального угла наклона солнечных панелей для размещения их в произвольном регионе // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2023. Т. 23. № 1. С. 5–11. <https://doi.org/10.14529/power230101>. EDN: ZDAYFE.

References

1. Bezrukih P.P. Development trends of the global electric power industry in the 21st century. *Vestnik Moskovskogo ehnergeticheskogo institute = Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2022;3:43-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-3-43-52>. EDN: RSVNKK.
2. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Choosing the parameters and analyzing the efficiency of solar tracking systems. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018;329(10):95-106. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2018/10/2109>. EDN DAVIDS.
3. Aguila-Leon J., Vargas-Salgado C., Chiñas-Palacios C.D., Díaz-Bello D. Solar photovoltaic maximum power point tracking controller optimization using grey wolf optimizer: a performance comparison between bio-inspired and traditional algorithms. *Expert Systems with Applications*. 2023;211(5):118700. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118700>.
4. Hanzaei S.H., Gorji S.A., Ektesabi M. A scheme-based review of MPPT techniques with respect to input variables including solar irradiance and PV arrays' temperature. *IEEE Access*. 2020;8:182229-182239. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028580>.
5. Dhawan A., Malik O.P., Kumar R. Solar tracker implementation using MATLAB/SIMULINK. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 2018;5(5):178-189.
6. Mukhambdyarov B.B., Lukichev D.V., Polyuga N.L. Study of maximum power point tracking algorithms for efficiency growth of photovoltaic cells. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Bulletin of information Technologies, Mechanics and Optics*. 2018;18(6):1099-1107. (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-6-1099-1107>.
7. AL-Rousan N., Isa N.A.M., Desa M.K.M. Advances in solar photovoltaic tracking systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018;82(1):2548-2569. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.077>.
8. Mitrofanov S.V., Nematsev A.U., Baykasenov D.K. Primary testing of automated dual-axis solar tracker in the climatic conditions of the Orenburg region as the prospects for the establishment of a hardware-software complex. *Alternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2018;(7-9):43-54. (In Russ.). <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.07-09.043-054>.
9. Hafez A.Z., Yousef A.M., Harag N.M. Solar tracking systems: technologies and trackers drive types – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;91:754-782. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.094>.
10. Batayneh W., Bataineh A., Soliman I., Hafees S.A. Investigation of a single-axis discrete solar tracking system for reduced actuators and maximum energy collection. *Automation in Construction*. 2019;98:102-109. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.011>.
11. Bahrami A., Okoye C.O., Atikol U. The effect of latitude on the performance of different solar trackers in Europe and Africa. *Applied Energy*. 2016;177:896-906. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.103>.
12. De Sá Campos M.H., Tiba C. npTrack: A n-position single axis solar tracker model for optimized energy collection. *Energies*. 2021;14(4):925. <https://doi.org/10.3390/en14040925>.
13. Fodhil F., Hamidat A., Nadjemi O. Potential, optimization and sensitivity analysis of photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system for rural electrification in Algeria. *Energy*. 2019;169:613-624. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.049>.

14. Abdelshafy A.M., Hassan H., Jurasz J. Optimal design of a grid-connected desalination plant powered by renewable energy resources using a hybrid PSO–GWO approach. *Energy Conversion and Management*. 2018;173:331-347. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.083>.
15. Brandoni C., Renzi M. Optimal sizing of hybrid solar micro-CHP systems for the household sector. *Applied Thermal Engineering*. 2015;75:896-907. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.023>.
16. Mattei M., Notton G., Cristofari C., Muselli M., Poggi P. Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance. *Renewable Energy*. 2006;31(4):553-567. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.03.010>.
17. Bahrami A., Okoye C.O., Atikol U. Technical and economic assessment of fixed, single and dual-axis tracking PV panels in low latitude countries. *Renewable Energy*. 2017;113:563-579. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.095>.
18. Bakhshi-Jafarabadi R., Sadeh J. A comprehensive economic analysis method for selecting the PV array structure in grid-connected photovoltaic systems. *Renewable Energy*. 2016;94:524-536. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.091>.
19. Khatib T., Deria R. East-west oriented photovoltaic power systems: model, benefits and technical evaluation // *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 266. Iss. 15. P. 115810. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115810>.
20. Yadav A.K., Chandel S.S. Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;23:503-513. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.027>.
21. Liu B.Y.H., Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted toward the equator. *ASHRAE Transactions*. 1962;67:526-541.
22. Liu B.Y.H., Jordan R.C. The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors. *Solar Energy*. 1963;7(2):53-74. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(63\)90006-9](https://doi.org/10.1016/0038-092x(63)90006-9).
23. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Mathematical model of solar radiation incident on an arbitrarily oriented surface for any region in Russia. *Альтернативная энергетика и экология = Alternative Energy and Ecology*. 2017;16-18:43-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.16-18.043-056>.
24. Konovalov Yu.V., Khaziev A.N. Insolation calculations of a photovoltaic power plant taking into account location-based and weather parameters. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):439-450. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-439-450>. EDN: CQEYQC.
25. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar engineering of thermal processes*. Madison, Wisconsin: John Wiley & Sons; 2013, p. 770-781.
26. Mitrofanov S.V. Choosing the optimal angle of inclination of solar panels in an arbitrary region. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika = Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2023;23(1):5-11. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power230101>. EDN: ZDAYFE.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Митрофанов Сергей Владимирович,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры электро- и теплоэнергетики,
директор Института энергетики, электроники и связи,
Оренбургский государственный университет,
460018, г. Оренбург, просп. Победы, 13, Россия
✉ mitser2002@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6640-8434>

Байкашенов Дамир Куандыкович,

аспирант,
Оренбургский государственный университет,
460018, г. Оренбург, просп. Победы, 13, Россия
baykasenov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8810-4335>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 25.08.2023 г.;
одобрена после рецензирования 10.10.2023 г.;
принята к публикации 15.10.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. Mitrofanov,

Cand. Sci (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Electrical and Thermal Power Engineering,
Director of the Institute of Energy,
Electronics and Communications,
Orenburg State University,
13 Pobedy pr., Orenburg 460018, Russia
✉ mitser2002@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6640-8434>

Damir K. Baykasenov,

Postgraduate student,
Orenburg State University,
13 Pobedy pr., Orenburg 460018, Russia
baykasenov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8810-4335>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 25.08.2023;
approved after reviewing 10.10.2023;
accepted for publication 15.10.2023.



Научная статья

УДК 621.337.41

EDN: IWEJTW

DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-749-759

Выбор схемы питания управляемых преобразователей возбуждения тяговых электродвигателей электровозов однофазно-постоянного тока

Н.Л. Михальчук¹✉¹Дирекция тяги, филиал ОАО «Российские железные дороги», г. Москва, Россия

Резюме. Целью исследований являлась разработка эффективного схемотехнического решения и алгоритмов автоматического управления электровозами однофазно-постоянного (переменного) тока по законам постоянства силы тяги и постоянства мощности без переключения электрическими аппаратами силовых электрических цепей. Для решения обозначенной задачи использовались методы математического моделирования электромагнитных, электромеханических и механических процессов в среде MatLab, Simulink, SimPowerSystems. При этом учитывались нелинейности кривой намагничивания, а также выполнялся отдельный учет влияния вихревых токов от обмоток главных и добавочных полюсов тяговых электродвигателей. При моделировании применялся структурный и параметрический синтез силовой электрической схемы и алгоритмов управления с применением управляемых мостовых IGBT-преобразователей. Объектом исследования являлся электротехнический комплекс – трехсекционный электровоз типа ЗЭС5К «Ермак» мощностью 9840 кВт. По результатам проведенных исследований, в качестве технического решения предложено на исследуемом электровозе применить силовую электрическую схему с двумя выпрямительно-инверторными преобразователями на каждую из трех секций. Данные преобразователи обеспечивают питание четырех тяговых электродвигателей мощностью 820 кВт и схему группового питания управляемых мостовых IGBT-преобразователей, шунтирующих обмотки возбуждения для поосного управления силой тяги. Таким образом, выполненные расчеты подтвердили возможность реализации схемы индивидуального управления токами тяговых электрических двигателей и токами возбуждения, обеспечивая плавное нарастание силы тяги электровоза. Разработанный алгоритм поосного управления силой тяги обеспечивает плавное увеличение этой силы и создает лучшие условия для сцепления колес электровоза с рельсами. Данные решения могут быть использованы при изготовлении новых и модернизации эксплуатируемых электровозов.

Ключевые слова: электропривод электровозов однофазно постоянного тока, управляемый полупроводниковый транзисторный преобразователь возбуждения, групповая схема питания, независимое возбуждение коллекторных тяговых электродвигателей

Для цитирования: Михальчук Н.Л. Выбор схемы питания управляемых преобразователей возбуждения тяговых электродвигателей электровозов однофазно-постоянного тока // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 749–759. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-749-759>. EDN: IWEJTW.

POWER ENGINEERING

Original article

Selection of power supply scheme for controlled excitation converters in traction electric motors of single-phase DC electric locomotives

Nikolay L. Mikhalchuk¹✉¹Joint Stock Company “Russian Railways” (JSCo “RZD”), Moscow, Russia

Abstract. The article focuses on the development of an effective design and algorithms for automatic control of single-phase DC electric locomotives according to the laws of constant traction force and power without switching electrical devices within power electric circuits. Methods of mathematical modelling for electromagnetic, electromechanical, and mechanical processes by MatLab, Simulink, and SimPowerSystems software were used to address this problem. The nonlinearities of the magnetisation curve were taken into account, along with the influence of eddy currents from the

coils of the main and additional poles in traction motors. Structural and parametric synthesis of a power electrical circuit and control algorithms by controlled bridge IGBT converters were used in the simulation. The object of the research was an electrotechnical complex, including a 9840 kW three-stack electric locomotive 3ES5K "Ermak". On the basis of the research results, it is recommended to use a power electrical circuit with two reversible converters for each of the three sections on the electric locomotive. These converters provide power to four 820 kW traction motors and a group power supply for controlled bridge IGBT converters shunting the field coils for axial traction control. The calculations confirmed the applicability of a scheme for individual control of traction electric motors and excitation currents, ensuring a smooth increase in the traction force of an electric locomotive. The developed algorithm of axial traction control ensures a smooth increase in this force and creates the optimal conditions for coupling the wheels of an electric locomotive with rails. These solutions can be used in the manufacture and modernisation of new and existing electric locomotives.

Keywords: electric drive of single-phase direct current electric locomotives, controlled semiconductor transistor excitation converter, batch power supply circuit, separately excited commutator traction motors

For citation: Mikhailchuk N.L. Selection of power supply scheme for controlled excitation converters in traction electric motors of single-phase DC electric locomotives. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):749-759 (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-749-759>. EDN: IWEJTW.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с прогнозируемым ростом грузооборота на железных дорогах России предусмотрено развитие Восточного полигона с увеличением пропускной способности Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей до 180 млн т в год, что в 1,5 раза выше существующих объемов перевозок^{2,3}.

Для реализации поставленных задач необходимо обеспечить тяжеловесное движение локомотивами на полигонах обращения, способных по своим характеристикам перевозить поезда массой 7100–8000 т и более, с улучшенными тяговыми и энергетическими характеристиками.

Необходим поиск новых технических решений для совершенствования и повышения эффективности электровозов, разработка алгоритмов эффективного автоматического управления электроприводом. В связи с этим на железных дорогах мира выполняются работы по повышению мощности локомотивов за счет увеличения мощности тяговых электродвигателей (ТЭД), количества тяговых осей, повышения сцепного веса локомотивов и т.д. [1, 2].

Появление на рынке новых силовых полупроводниковых приборов (СПП) позволило реализовать новые схемотехнические решения и создавать экономичные и безот-

казные виды силовых, полупроводниковых преобразователей, повышающих тяговые [3] и сцепные свойства локомотивов, а также обеспечивающие повышение их энергоэффективности [4–6].

АНАЛИЗ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из направлений совершенствования тяговых свойств локомотивов для повышения весовых норм поездов и увеличения пропускных и провозных способностей железнодорожной сети является применение независимого возбуждения коллекторных ТЭД. Эффективность независимого возбуждения объясняется высокой жесткостью тяговых характеристик, что обеспечивает повышение противобуксовочных свойств локомотива при прохождении колесной парой элементов пути с плохими условиями сцепления колесных пар с рельсами⁴ [7, 8]. В нашей стране и за рубежом созданы электровозы с алгоритмами управления силовыми полупроводниковыми преобразователями, которые позволяют реализовать режимы независимого и последовательного возбуждения ТЭД [9].

Новочеркасским локомотивостроительным заводом, входящим в состав группы транспортного машиностроения «Трансмашхолдинг», выпускаются электровозы серии «Ермак»⁵ [10] однофазно-постоянного тока в двух (2ЭС5К), трехсекционном (ЗЭС5К) и четырехсекцион-

²О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2030 года: Указ Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 г. № 474.

³Распоряжение Правительства Российской Федерации, Паспорт инвестиционного проекта "Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (второй этап)" от 28 апреля 2021 года №1100-р. <http://government.ru/docs/42120/>

⁴Авт. св-во № 393138, СССР, В60L 9/12. Электрический привод локомотива / А.Т. Головатый, Л.Я. Финкельштейн, Н.Л. Шамраев [и др.]. Заявл. 10.06.1971; опубл. 07.07.1984. Бюл. № 25.

⁵Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К). Руководство по эксплуатации. ИДМБ.661142.009РЭ

(ЗТС.001.012РЭ). Новочеркасский электровозостроительный завод. Новочеркасск, 2007. Т. 1. 635 с.; Т. 2. 640 с.

ном (4ЭС5К) исполнениях, каждая секция которых оборудована токоприемником $XA1$, ($XA2$ – токоприемник второй секции), разъединителем $QS1$, главным выключателем $QF1$, фильтром помехоподавления $Z1$, тяговым трансформатором $T5$ с выводами A и X для его подключения через проходные изоляторы первичной обмотки трансформатора (рис. 1), тиристорными выпрямительно-инверторными устройствами (ВИУ1 и ВИУ2), подключенных ко вторичным обмоткам трансформатора $T5$ $a_1 - 1 - 2 - x_1$, $a_2 - 3 - 4 - x_2$, к которым в свою очередь подключены через сглаживающие реакторы (СР) по два коллекторных тяговых электродвигателя (М) НБ514Е с номинальной часовой мощностью 820 кВт и с классом изоляции Н через сглаживающие реакторы (СР). Тормозной переключатель (ПТ) обеспечивает переключение силовой электрической схемы в режим электрического торможения. При переключении и сборе схемы рекуперативного торможения подключаются $r_{ст}$ – блоки балластных резисторов, которые обеспечивают выравнивание токов якорей ТЭД в этом режиме, при этом все обмотки возбуждения включаются последовательно.

Электровоз оборудован пультом управления машиниста (ПУМ) и микропроцессорной системой управления и диагностики (МПСУ). В режиме независимого возбуждения обмотки возбуждения (ОВ) отключаются от якорей (М) ТЭД, соединяются последовательно и подключаются к источнику питания. В качестве такого

источника используют двухполупериодный тиристорный управляемый выпрямитель с нулевым выводом 5 (ВУВ), подключенный к вторичным обмоткам трансформатора $a_3 - 5$, $5 - x_3$. К каждой обмотке возбуждения параллельно подключен шунтирующий резистор $r_{ш}$ и шунтирующий тиристор VSO . Реализация потележного или поосного автоматического управления электровозом в режиме независимого или последовательного возбуждения ТЭД производится в зависимости от изменения скорости движения v_i . Пульт управления машиниста передает сигнал задаваемой скорости движения - v_3 в МПСУ для сравнения с фактической скоростью - v_i , и последующим формированием сигналов управления угла открытия тиристорных плеч α_{pi} ВИУ1 и ВИУ2, формированием сигналов управления α_B тиристорных плеч ВУВ при независимом возбуждении ТЭД в тяговом режиме и режиме рекуперации и сигналы управления α_{oi} для шунтирующих тириستоров обмотки возбуждения VSO . Для формирования сигналов управления микропроцессорной системой по каналам обратной связи на вход МПСУ поступает информация о величине токов на обмотках возбуждения ТЭД I_B и о значении токов двигателей $I_{яi}$.

Схемотехнические решения электропривода с независимым возбуждением и поосным управлением силой тяги позволяют эффективно реализовывать режимы трогания и разгона поезда, а также работу на участках с критическими подъемами, то есть в наиболее

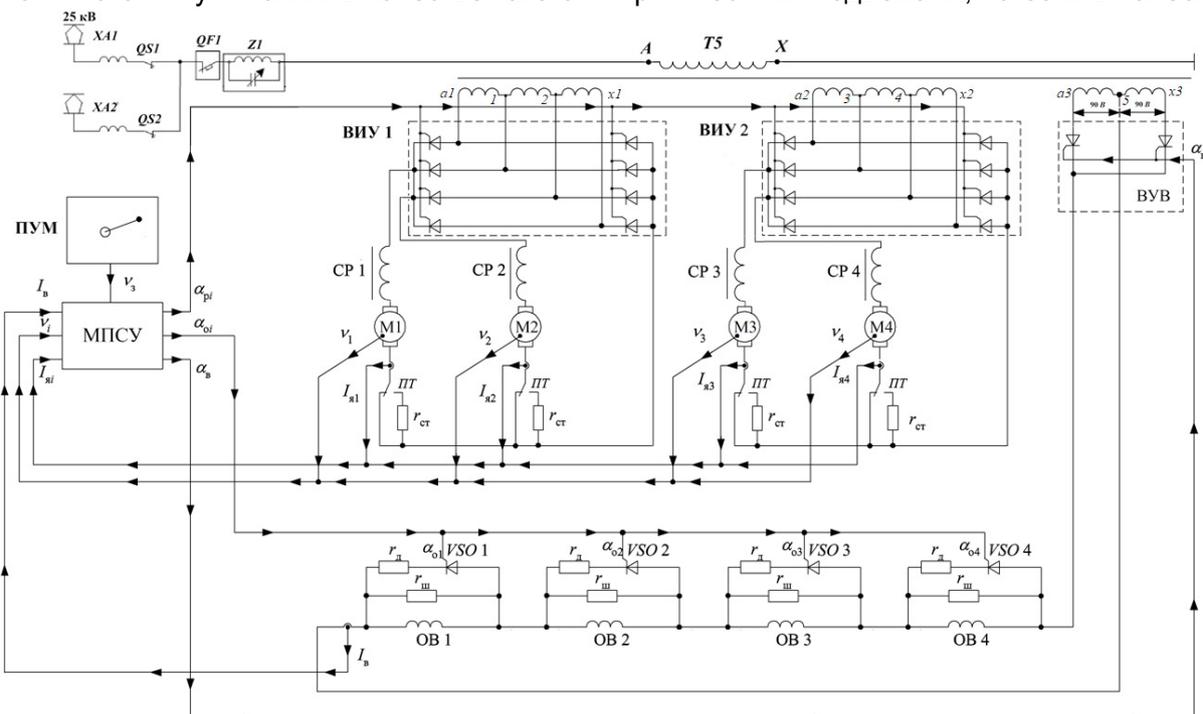


Рис. 1. Упрощенная схема силовых цепей одной секции эксплуатируемого электровоза «Ермак» 2 (3, 4) ЭС5К
Fig. 1. Simplified scheme of one section power circuits of the operated electric locomotive "Ermaк" 2 (3, 4) ES5K

тяжелых режимах эксплуатации тягового электропривода. На равнинных участках и на спусках при высоких скоростях движения происходит переключение на последовательное возбуждение ТЭД.

В настоящее время в России и в мире для реализации тяжеловесного движения поездов применяют также тяговый электропривод электровозов с асинхронным ТЭД [11]. Выполненное в нашей работе [12] сравнение тяговых характеристик асинхронного ТЭД с коллекторным двигателем, работающим в режимах независимого или последовательного возбуждения, показало, что в режимах трогания и разгона преимущество имеют электровозы с коллекторными ТЭД в режиме независимого возбуждения и их следует применять на грузо-

вых электровозах в тяжеловесном движении. Вместе с тем в режимах движения на высоких скоростях преимущество имеют электровозы с асинхронными ТЭД, а поэтому их применение приоритетно в пассажирском движении и для выполнения контейнерных перевозок [13, 14].

Для исследования работоспособности и качества функционирования электровозов «Ермак» независимым возбуждением ТЭД были проведены тягово-энергетические испытания с тяжеловесными поездами 7100 т на участке Тайшет – Иркутск Восточно-Сибирской железной дороги. Проведенные исследования выявили ряд существенных недостатков этих электровозов в реализованных схмотехнических решениях и алгоритмах работы силовой электрической цепи [15].

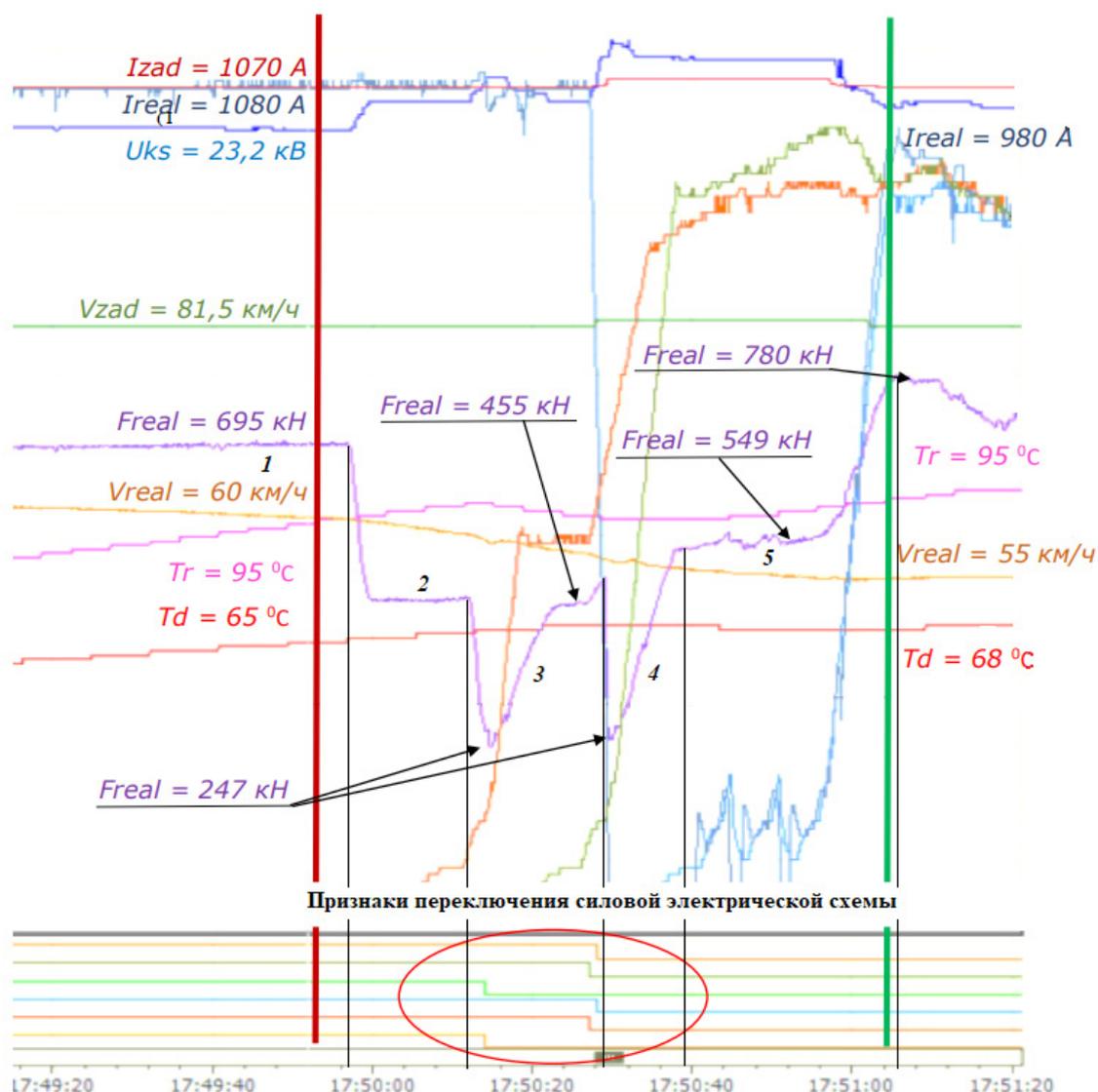


Рис. 2. Регистрация параметров движения поезда микропроцессорной системой управления и диагностики головной секции электровоза

Fig. 2. Recording of train movement parameters by the microprocessor control and diagnostic system of the electric locomotive head section

Расшифрованные результаты измерений, выполненные бортовыми системами диагностики, входящими в состав МПСУ (рис. 2), показали следующее. При движении электровоза с тяжеловесным составом на критический подъем происходит снижение скорости (параметр V_{real}) ниже 60 км/ч. При этом начинается процесс переключения на независимое возбуждение ТЭД отдельных секций электровоза, сопровождающийся разрывом силовой цепи.

Вначале на независимое возбуждение переводится третья секция, что вызывает снижение силы тяги электровоза с величины 695 кН (параметр F_{real} на рис. 2) до величины 455 кН – режим, обозначенный как «1». Далее отключается вторая секция со снижением силы тяги до 247 кН (режим 2). После этого происходит включение на независимое возбуждение третьей секции, что сопровождается увеличением силы тяги до 455 кН (режим 3). Затем отключается первая секция электровоза со снижением силы тяги повторно до 247 кН.

Далее, включается вторая секция и происходит увеличение силы тяги до 549 кН (режим 4), а потом включается первая секция и сила тяги увеличивается с 549 кН до 780 кН. Все эти переключения происходят в течение 60 с (по 15 с для каждого режима) и сопровождаются снижением скорости (параметр V_{real}) до 55 км/ч при движении поезда на критический подъем с увеличением тягового тока и ростом температуры силового предельно нагруженного электрооборудования обозначена на рис. 2 температура нагрева сглаживающих реакторов T_r и тяговых двигателей T_d соответственно, измеряемая в градусах, °С. Такие изменения силы тяги вызывают появление толчков и рывков в составе поезда, увеличивая риск

превышения допустимых сил в автосцепках и, как следствие, их разрушение и обрыв. Кроме этого, микропроцессорной системой управления учитываются (рис. 2) и фиксируются параметры: U_{ks} – напряжение в контактной сети, кВ; I_{real} – среднее значение тока тяговых двигателей, А. Заданные системой управления предельные значения скорости V_{zad} , км/ч; и среднего значения тока тяговых двигателей I_{zad} , А.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

По результатам выявленных недостатков силовой электрической схемы и проведенных исследований электровозов серии «Ермак» проведена разработка, структурный и параметрический синтез новой силовой электрической схемы этого электровоза [16–18] на основе замены тиристорных управляемых выпрямителей возбуждения ВУВ, на индивидуальные управляемые транзисторные мостовые преобразователи возбуждения (УПВ).

Для питания этих преобразователей была предусмотрена индивидуальная схема с подключением каждого из них к отдельным вторичным обмоткам трансформатора через диодные выпрямители (ДВ1-4) с $L - C$ фильтрами (рис. 3). Такая индивидуальная схема питания обеспечивает гальваническую развязку УПВ, а ее применение позволило разработать принципы управления этими преобразователями [19]. Вместе с тем схема индивидуального управления значительно усложняет конструкцию тягового трансформатора, так как требует замены вторичных обмоток трансформатора $a_3 - 5, 5 - x_3$ (см. рис. 1) на четыре одновитковые обмотки $a_{31} - x_{31}, a_{32} - x_{32}, a_{33} - x_{33}$ и $a_{34} - x_{34}$ (рис. 3).

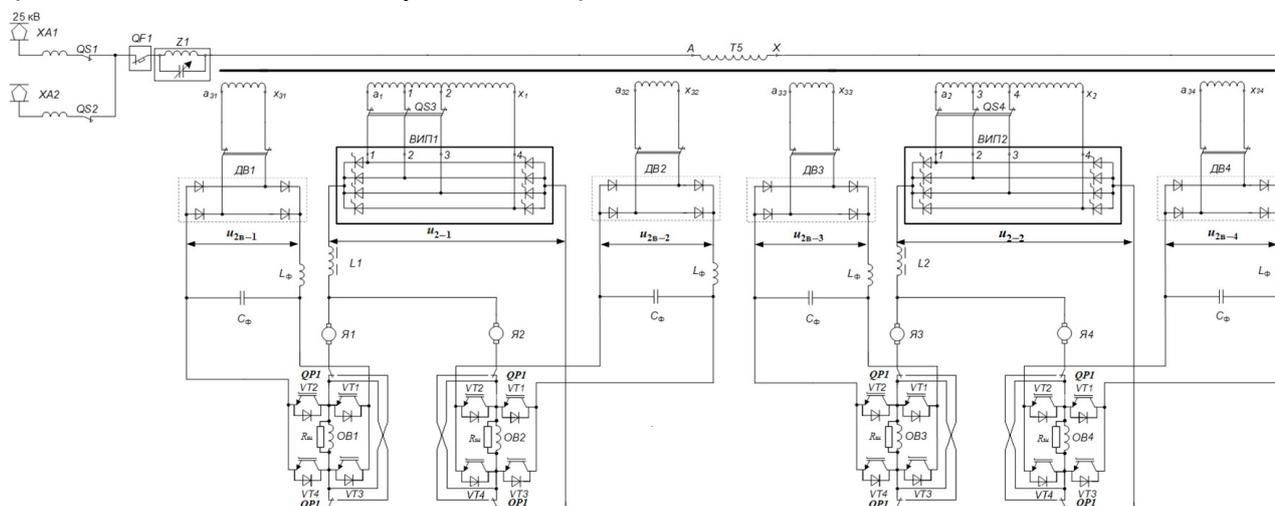


Рис. 3. Упрощенная схема силовых цепей одной секции электровоза с управляемыми преобразователями возбуждения
Fig. 3. Simplified scheme of one section power circuits of an electric locomotive with controlled excitation converters

Для оценки возможности упрощения конструкции трансформатора на основе применения групповой схемы питания УПВ1–4 от одной обмотки трансформатора a_3-x_3 через один диодный выпрямитель были выполнены сравнительные расчеты токов ТЭД $I_{дi}(t)$ и токов возбуждения ТЭД $I_{вi}(t)$ для индивидуальной и групповой схем питания УПВ. При этом было принято, что на второй секции электровоза реализована индивидуальная схема питания УПВ, а на третьей секции – групповая.

Заданные значения токов возбуждения $I_{вzi}^H$ для режима независимого возбуждения ТЭД могут быть получены на основе реализации режима подпитки ОВ путем открытия транзисторов $VT1, VT4$ каждого преобразователя УПВ1-4 (см. рис. 3) в момент времени $t = 0$ с. При этом появляются токи подпитки $I_{пzi}$, создающие магнитные потоки $\Phi_{i'}$, необходимые для обеспечения нормальной работы ТЭД при последующем включении выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП), создающих токи двигателей $i_{дi}$.

$$I_{пzi} = I_{вzi}^H - i_{дi}. \quad (1)$$

Таким образом, токи $I_{пzi}$ будут уменьшаться по мере роста $i_{дi}$ и достигнут установившихся значений. С помощью этих токов реализуются три различные тяговые характеристики независимого возбуждения: **Т30** – усиленная характеристика для режима $I_{вzi}^H = 1000$ А (табл. 1); **Т1** – часовая усиленная характеристика с током $I_{вzi}^H = 870$ А и

ТД – характеристика длительного режима работы $I_{вzi}^H = 810$ А.

Таблица 1. Заданные значения сил тяги и токов электровоза, соответствующие характеристикам независимого возбуждения тяговых электродвигателей
Table 1. Set values of traction forces and electric locomotive currents corresponding to the characteristics of the separate excitation of traction electric motors

Параметры	Тяговые характеристики		
	Т30	Т1	ТД
$F_{кз}, кН$	839	696,2	635,7
$I_{дэ}^H, А$	1000	870	810

Для получения характеристики последовательного возбуждения с уменьшенным (ослабленным) током $I_{вз}^{пм1}$ предложено выполнить режим отпитки обмоток возбуждения ТЭД током $I_{оз}$ путем открытия транзисторов $VT2, VT3$ каждого УПВ1-4 с запаздыванием по отношению к появлению тока $i_{дi}$:

$$I_{оз} = i_{дi} - I_{вз}^{пм1} = i_{дi} - \beta i_{дi} = (1 - \beta) i_{дi}, \quad (2)$$

где β – коэффициент уменьшения тока возбуждения $\beta = 0,45$. Тогда ток отпитки будет равен: $I_{оз} = 0,55 i_{дi}$.

В математической модели, на основе которой были выполнены расчеты токов $i_{дi}(t)$ и $I_{вi}(t)$, учитывалась нелинейность кривой намагничивания, а также выполнялось индивидуальное определение вихревых токов, вызываемых обмотками возбуждения и обмотками дополнительных полюсов ТЭД [20, 21]. Система уравнений, описывающих процессы изменения токов $I_{дi}(t)$ и $I_{вi}(t)$ с учетом этих особенностей, имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} c_e v \Phi + r_{я+дп} i_{дi} + \frac{d\Psi_{я+дп}}{dt} + r_{в} i_{в} + \frac{d\Psi_{в}}{dt} &= u_d \\ i_{в} &= i_{дi} \pm i_{доп} \\ \frac{d\Psi_{в}}{dt} + r_{в} i_{доп} &= u_{вн} \\ 1,23 r_{\mu 1} \Phi_1 + i_{\mu в} w_{в} - r_{\mu 1} \Phi + L_{\mu} \frac{d\Phi_1}{dt} &= i_{в} w_{в} = F_{в} \\ 5,29 r_{\mu 1} (\Phi - \Phi_1) + i_{\mu в} w_{в} - r_{\mu 1} \Phi + 0,475 L_{\mu} \frac{d}{dt} (\Phi - \Phi_1) &= F_{в} \\ 1,23 r_{\mu 1д} \Phi_{1мд} + i_{\mu д} w_{д} - r_{\mu 1д} \Phi_{мд} + L_{\mu д} \frac{d\Phi_{1мд}}{dt} &= i_{я} w_{д} = F_{д} \\ 5,29 r_{\mu 1д} (\Phi_{мд} - \Phi_{1мд}) + i_{\mu д} w_{д} - r_{\mu 1д} \Phi_{мд} + 0,475 L_{\mu д} \frac{d}{dt} (\Phi_{мд} - \Phi_{1мд}) &= F_{д} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

В этих уравнениях обозначено:

u_d – напряжение, прикладываемое от выпрямительно-инверторных преобразователей к ТЭД, В;

u_{BH} – напряжение возбуждения, прикладываемое от УПВ к обмоткам возбуждения ТЭД, В;

$r_{я+дп}$ – сопротивления якоря и обмотки добавочных полюсов ТЭД, Ом;

L_{μ} – индуктивность основного потока, Гн;

$L_{\mu d} = L_{я} + L_{дп}$ – индуктивность основного

потока, Гн;

r_b – сопротивление обмотки возбуждения, Ом;

$\Psi_b, \Psi_{я+дп}$ – потокосцепления обмотки возбуждения, а также якоря с добавочными полюсами, Вб;

$i_{доп}$ – токи подпитки или отпитки, создаваемые УПВ, А;

$1,23r_{\mu 1}, 5,29r_{\mu 1}$ – магнитное сопротивление основному потоку и магнитное сопротивление потоку высших гармоник, Гн⁻¹;

$1,23r_{\mu 1}, 5,29r_{\mu 1}$ – магнитное сопротивление потоку первой гармоники добавочных полюсов и магнитное сопротивление потоку высших гармоник добавочных полюсов, Гн⁻¹;

L_{μ} и $L_{\mu d}$ – индуктивность основного потока и индуктивность основного потока добавочных полюсов, Гн;

Φ и Φ_1 – полный магнитный поток ТЭД и магнитный поток первой гармоники, Вб;

ω_d и ω_b – число витков якоря, добавочных полюсов и обмотки возбуждения;

$i_{\mu d}$ – намагничивающий ток добавочных полюсов, А;

$\Phi_{мд}$ и $\Phi_{1мд}$ – полный магнитный поток добавочных полюсов и магнитный поток первой гармоники добавочных полюсов, Вб;

F_d и F_b – МДС добавочных полюсов и МДС обмотки возбуждения, А.

Рассмотрим результаты расчетов переходных процессов двигателей и возбуждения для второй и третьей секций электровоза при следующих режимах работы:

– трогание и разгон до выхода на заданное значение силы тяги 839 кН, которое соответствует току ТЭД 1000 А (см. табл. 1);

– снижение заданного значения силы тяги на ~25%, т. е. с 839 кН до 635,7 кН в момент времени 20 с, что соответствует переходу с характеристики **T30** на **T1**;

– восстановление заданного значения силы тяги в момент времени 30 с.

При этом в качестве токов возбуждения и двигателей будем рассматривать их установившиеся значения I_{Bi}^H и $I_{дi}^H$.

Результаты этих расчетов для второй секции электровоза с индивидуальной системой питания УПВ и третьей секции с групповой схемой питания (см. рис. 3) показывают следующее. В момент трогания включаются преобразователи УПВ, появляются токи подпитки, а токи возбуждения $I_{Bi}(t)$ достигают установившихся значений, приведенных в табл. 2 для характеристики **T30**, к моменту времени 2–2,5 с (рис. 4 а).

Таблица 2. Заданные значения токов возбуждения и двигателя тяговых электродвигателей для тяговых характеристик **T30** и **T1**

Table 2. Set values of excitation currents and traction motor for traction characteristics **T30** and **T1**

Вид характеристики	№ ТЭД	I_{Bi}, A	$I_{дi}, A$
T30	ТЭД1	849	895
	ТЭД2	850	945
	ТЭД3	910	1027
	ТЭД4	950	1065
T1	ТЭД1	787	800
	ТЭД2	800	840
	ТЭД3	868	900
	ТЭД4	900	943

Токи ТЭД $I_{дi}^H(t)$ изменяются по-другому (рис. 4 б) в соответствии с принципами управления, рассмотренными в [19]. Вначале включаются ТЭД № 11 и 12 на третьей секции в момент времени $t = 5$ с. Такое запаздывание необходимо для того, чтобы токи возбуждения этих ТЭД гарантированно достигли своих установившихся значений, и включение ТЭД происходило при независимом их возбуждении, создаваемом преобразователями УПВ. Затем, когда токи $I_{д11}^H(t)$ и $I_{д12}^H(t)$ в момент времени ~6 с достигнут ~90% от своих установившихся значений, приведенных в табл. 2, включаются в работу ТЭД № 7 и 8 на второй секции.

ТЭД № 9 и 10 будут включаться в работу после того, как включатся ТЭД № 3 и 4 второй секции и достигнут ~90% от своих установившихся значений, приведенных в табл. 2, т. е. в момент времени ~10 с. После того, как токи ТЭД № 9 и 10 также достигнут ~90%, в работу включатся ТЭД № 5 и 6, т. е. в момент времени ~12 с.

В момент времени $t = 20$ с происходит второй переход с характеристики **T30** на характеристику **T1** (часовой режим). При этом токи $I_{дi}^H(t)$ снижаются до новых установившихся значений с некоторым перерегулированием, не превышающим 5%.

В момент времени $t = 30$ с происходит

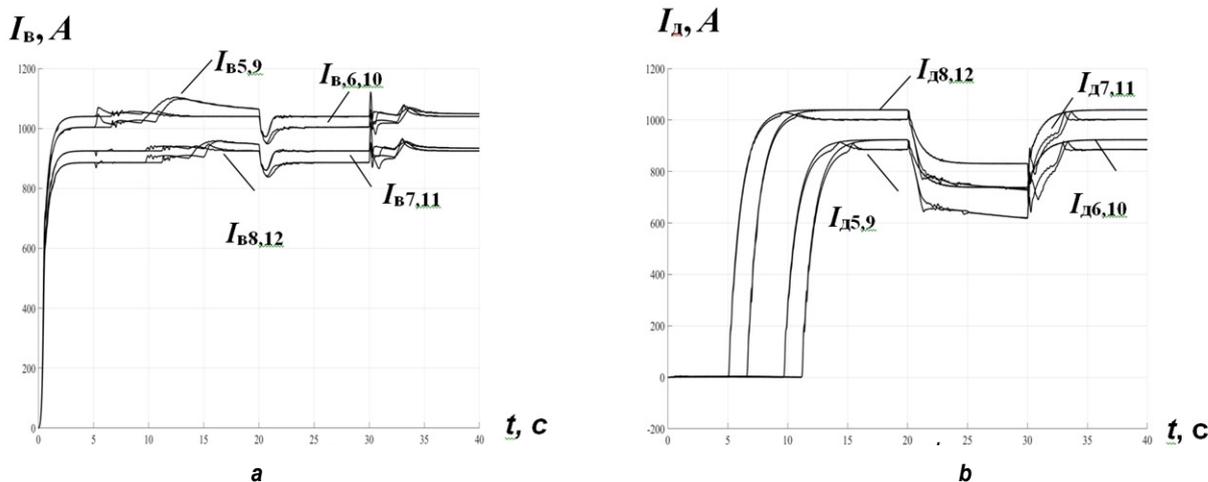


Рис. 4. Графики изменения тока возбуждения (а) и токов тяговых электродвигателей (б)
 Fig. 4. Variance curves of the excitation current (a) and traction motor currents (b)

третий переход с характеристики Т1 на характеристику Т30, и токи ТЭД начинают возрастать до установившихся значений, соответствующих этой характеристике – см. табл. 2. При этом в графиках токов $I_{вi}^H(t)$ и $I_{дi}^H(t)$ наблюдаются более высокие амплитуды высокочастотных составляющих, чем при первом и втором переходах. Однако величина амплитуды не превышает 10%, что допустимо.

Графики изменения токов $I_{д5}(t)$, $I_{д6}(t)$, $I_{д7}(t)$ и $I_{д8}(t)$ второй секции, на которой реализована схема индивидуального питания УПВ, практически не отличаются от графиков токов $I_{д9}(t)$, $I_{д10}(t)$, $I_{д11}(t)$ и $I_{д12}(t)$ третьей секции с групповым питанием УПВ. Таким образом, влияние гальванической развязки мало и можно в дальнейшем использовать силовую электрическую схему электровоза с групповым питанием УПВ.

Графики изменения сил тяги $F_{кi}(t)$ отдельных ТЭД (рис. 5 а) повторяют графики изме-

нения токов $I_{дi}^H(t)$ ТЭД. Амплитуды высокочастотных составляющих сил тяги, возникающие в групповой схеме питания при переходах с одной тяговой характеристики на другую, также не превышают допустимых 10%. Кроме того, графики $F_{кi}(t)$ для индивидуальной и групповой схем питания также практически не отличаются друг от друга. График (рис. 5 б) показывает, что суммарная сила тяги электровоза нарастает плавно, обеспечивая минимизацию продольных динамических сил в поезде.

Таким образом, выполненные исследования показали, что применение схемы группового питания УПВ не вызывает значительных изменений в графиках токов двигателей ТЭД $I_{дi}(t)$, а также сил тяги $F_{кi}(t)$, вызванных появлением гальванической связи. Поэтому систему группового питания можно использовать в предложенной силовой схеме электровоза (см. рис. 3).

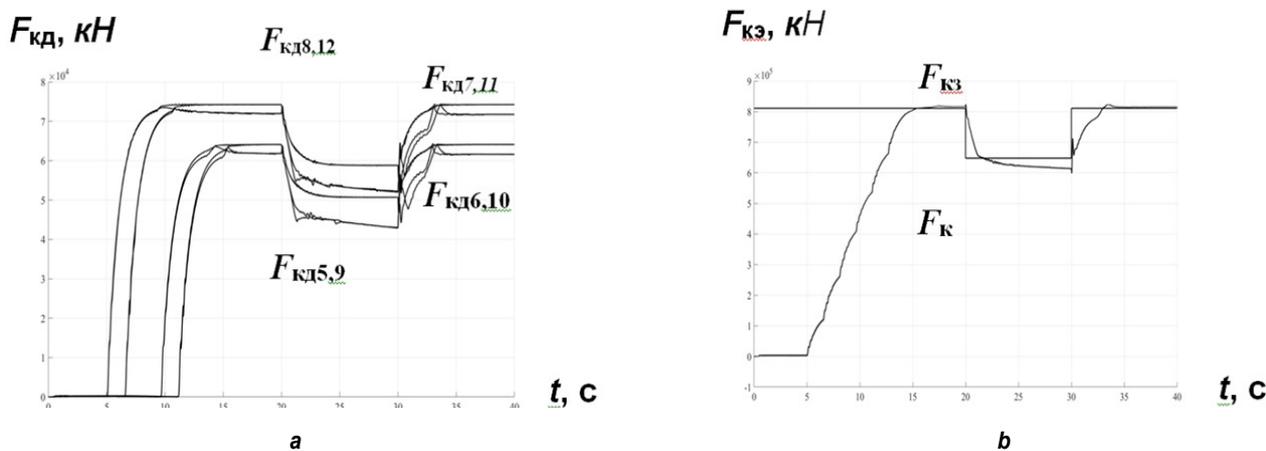


Рис. 5. Графики изменения сил тяги отдельных тяговых электродвигателей (а) и силы тяги электровоза (б)
 Fig. 5. Variance curves of the traction forces of individual traction motors (a) and the traction force of an electric locomotive (b)

В схеме с групповым питанием необходимо будет заменить обмотки трансформатора: $a_3 - 5, 5 - x_3$ (см. рис. 3) на одну одновитковую обмотку $a_3 - x_3$ напряжением 45 В с двумя выводами. Сечение этой обмотки и выводов должно быть рассчитано на ток 4000 А для питания четырех УПВ. Таким образом, мощность, потребляемая от обмотки $a_3 - x_3$, составит 180 кВ·А. При этом также нужно учесть, что токи подпитки $I_{пi}(t) = 1000$ А, создаваемые преобразователями УПВ, потребляются кратковременно в течение ~15 с [19] только до появления токов ТЭД $I_{дi}(t)$, а после того, как появятся эти токи $I_{дi}(t)$, токи возбуждения $I_{вi}(t)$ станут равны:

$$I_{вi}(t) = I_{пi}(t) - I_{дi}(t). \quad (4)$$

Таким образом, перегрузки по мощности

трансформатора электровоза при работе УПВ не произойдет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В предлагаемой силовой схеме электровоза возможно применение групповой схемы питания управляемых преобразователей возбуждения, так при этом практически отсутствует влияние гальванической связи между параллельно включаемыми преобразователями на характер изменения во времени токов и сил тяги тяговых электродвигателей.

2. Реализация разработанных ранее принципов управления преобразователями при групповой схеме их питания обеспечивает возможность плавного увеличения силы тяги электровоза при трогании и разгоне поезда.

Список источников

1. Spiryagin M., Wolfs P., Cole C., Spiryagin V., Sun Yan Quan, McSweeney T. Design and simulation of heavy haul locomotives and trains // Engineering & Technology. Boca Raton: CRC Press, 2016. 477 p. <https://doi.org/10.1201/9781315369792>. EDN: YBLZZJ.
2. Stolchnev A. World's most powerful electric locomotive Shen24 by CRRC for coal cargo service in China24 // TMH [Электронный ресурс]. URL: <https://rollingstockworld.com/locomotives/worlds-most-powerful-electric-locomotive-shen24-by-crrc-for-coal-cargo-service-in-china> (28.06.2023).
3. Fornander P. Refurbishment of class 11E locomotives for Spoonnet // Proceedings of the International Heavy Haul Association Specialist Technical Session: High Tech in Heavy Haul (Kiruna, 11–13 June 2007). Kiruna: Sweden, 2007. P. 203–212.
4. Ishrat T., Ledwich G., Vilathgamuwa M., Borghesani P. Wheel slip control based on traction force estimation of electric locomotives // Australasian Universities Power Engineering Conference. 2016. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2016.7749331>.
5. Михальчук Н.Л., Курилкин Д.Н., Урушев С.В., Макарова Е.И. Энергетическая эффективность полупроводниковых преобразователей локомотивов // Электротехника. 2018. № 10. С. 15–20. <https://doi.org/10.3103/S1068371218100073>. EDN: YAMGNV.
6. Михальчук Н.Л., Савоськин А.Н., Чучин А.А. Электромагнитные процессы в силовой схеме электровоза с управляемым преобразователем возбуждения // Электротехника. 2022. № 9. С. 34–42. https://doi.org/10.53891/00135860_2022_9_34. EDN: DZQWTP.
7. Головатый А.Т., Исаев И.П., Горчаков Е.В. Независимое возбуждение тяговых двигателей электровозов. М.: Транспорт, 1976. 152 с.
8. Михальчук Н.Л., Назаров Н.С., Капустин М.Ю. Система автоматического управления тяговым приводом с адаптивным возбуждением электродвигателей // Наука и техника транспорта. 2017. № 1. С. 14–20. EDN: YHWPIN.
9. Tornerud G. Austrian railways place Swedish thyristor locomotives in service // Rail Engineering International. 1972. Iss. 5. P. 84.
10. Задорожный В.Л. Особенности электровозов серии «Ермак» с поосным регулированием силы тяги // Локомотив. 2019. № 10. С. 11–16. EDN: MZSKFP.
11. Бенькович Н.И., Михальчук Н.Л., Ролле И.А., Агунов А.В., Марикин А.Н. Прямое цифровое управление токами асинхронных тяговых электродвигателей // Электроника и электрооборудование транспорта. 2019. № 6. С. 43–47. EDN: HXWEWA.
12. Михальчук Н.Л., Пудовиков О.Е., Савоськин А.Н., Чучин А.А. Электровоз с плавным управлением в режимах независимого и последовательного возбуждения тяговых электродвигателей // Железнодорожный транспорт. 2022. № 9. С. 35–39. EDN: CQGNZV.
13. Tian Ye, Liu Sheng, Daniel W.J.T., Meehan P.A. Investigation of the impact of locomotive creep control on wear under changing contact conditions // Vehicle System Dynamics. 2015. Vol. 53. Iss. 5. P. 692–709. <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1020815>.
14. Liu Sheng, Tian Ye, Daniel W.J.T. (Bill), Meehan P.A. Modelling of track wear damage due to changes in friction conditions: a comparison between AC and DC electric drive locomotives // Wear. 2016. Vol. 366–367. P. 338–345.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.023>.

15. Михальчук Н.Л., Попов Ю.И., Савоськин А.Н., Пудовиков О.Е., Чучин А.А. Повышение эффективности электропривода электровоза с управляемыми преобразователями возбуждения тяговых двигателей // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 2. С. 104–114. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-2-104-114>. EDN: DTQYEO.
16. Михальчук Н.Л., Савоськин А.Н., Чучин А.А. Силовая схема электровоза переменного тока с применением управляемого транзисторного преобразователя возбуждения // Электроника и электрооборудование транспорта. 2022. № 3. С. 18–22. EDN: SOUMML.
17. Пат. № 2788223, Российская Федерация, С1 В60L 9/02, В60L 9/12, Н02Р 7/28. Электрический привод электровоза / Ю.И. Попов, Н.Л. Михальчук, А.Н. Савоськин, О.Е. Пудовиков, А.А. Чучин; заявитель ОАО «Российские железные дороги». Заявл. 22.09.2022; опублик. 17.01.2023. Бюл. № 2. EDN: TSIIOX.
18. Пат. № 2787135, Российская Федерация, С1 G05F 1/10. Способ автоматического управления током тяговых электродвигателей подвижного состава / Ю.И. Попов, Н.Л. Михальчук, А.Н. Савоськин, О.Е. Пудовиков; заявитель ОАО «Российские железные дороги». Заявл. 29.03.2022; опублик. 29.12.2022. Бюл. № 1. EDN: RHJIUY.
19. Михальчук Н.Л., Пудовиков О.Е., Савоськин А.Н., Чучин А.А. Принципы управления электровозом однофазного постоянного тока с управляемыми преобразователями возбуждения // Электротехника. 2023. № 9. С. 6–13. EDN: FIJGZR.
20. Евсеев В.Ю., Савоськин А.Н. Математическая модель коллекторного тягового двигателя с отдельным учетом вихревых токов главных и добавочных полюсов // Электротехника. 2020. № 9. С. 32–38. EDN: QCLNPM.
21. Савоськин А.Н., Кулинич Ю.М., Алексеев А.С. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе «контактная сеть - электровоз» // Электричество. 2002. № 2. С. 29–35. EDN: MPLOHF.

References

1. Spiryagin M., Wolfs P., Cole C., Spiryagin V., Sun Yan Quan, McSweeney T. Design and simulation of heavy haul locomotives and trains. In: *Engineering & Technology*. Boca Raton: CRC Press; 2016, 477 p. <https://doi.org/10.1201/9781315369792>. EDN: YBLZZJ.
2. Stolchnev A. World's most powerful electric locomotive Shen24 by CRRC for coal cargo service in China24. *TMH* Available from: <https://rollingstockworld.com/locomotives/worlds-most-powerful-electric-locomotive-shen24-by-crrc-for-coal-cargo-service-in-china> [Accessed 28th June 2023].
3. Fornander P. Refurbishment of class 11E locomotives for Spoornet. In: *Proceedings of the International Heavy Haul Association Specialist Technical Session: High Tech in Heavy Haul*. 11–13 June 2007, Kiruna. Kiruna: Sweden; 2007, p. 203–212.
4. Ishrat T., Ledwich G., Vilathgamuwa M., Borghesani P. Wheel slip control based on traction force estimation of electric locomotives. In: *Australasian Universities Power Engineering Conference*. 2016. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2016.7749331>.
5. Mikhailchuk N.L., Kurilkin D.N., Urushev S.V., Makarova E.I. The energy efficiency of the semiconductor converters of engines or locomotives. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*. 2018;10:15–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.3103/S1068371218100073>. EDN: YAMGNV.
6. Mikhailchuk N.L., Savoskin A.N., Chuchin A.A. Electromagnetic processes in the power circuit of an electric locomotive with a controlled excitation converter. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*. 2022;9:34–42. (In Russ.). https://doi.org/10.53891/00135860_2022_9_34. EDN: DZQWTP.
7. Golovaty A.T., Isaev I.P., Gorchakov E.V. *Separate excitation of electric locomotive traction motors*. Moscow: Transport; 1976, 152 p. (In Russ.).
8. Mikhailchuk N.L., Nazarov N.S., Kapustin M.Yu. Automatic control system for traction drive with adaptive excitation of electric motors. *Nauka i tekhnika transporta = Science and Technology in Transport*. 2017;1:14–20. (In Russ.). (In Russ.). EDN: YHWPIN.
9. Tomerud G. Austrian railways place Swedish thyristor locomotives in service. *Rail Engineering International*. 1972;5:84.
10. Zadorozhnyj V.L. Features of the Ermak series electric locomotives with axle-by-axle traction control. *Lokomotiv*. 2019;10:11–16. (In Russ.). EDN: MZSKFP.
11. Benkovich N., Michalchuk N., Rolle I., Agunov A., Marikin A. Direct digital current control system of asynchronous traction motors. *Elektronika i elektroobrudovanie transporta*. 2019;6:43–47. EDN: HXWEWA.
12. Mikhailchuk N.L., Pudovikov O.E., Savoskin A.N., Chuchin A.A. Electric locomotive with stepless control in independent and sequential excitation modes of traction motors. *Zheleznodorozhnyj transport*. 2022;9:35–39. (In Russ.). EDN: CQGNZV.
13. Tian Ye, Liu Sheng, Daniel W.J.T., Meehan P.A. Investigation of the impact of locomotive creep control on wear under changing contact conditions. *Vehicle System Dynamics*. 2015;53(5):692–709. <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1020815>.
14. Liu Sheng, Tian Ye, Daniel W.J.T. (Bill), Meehan P.A. Modelling of track wear damage due to changes in friction conditions: a comparison between AC and DC electric drive locomotives // *Wear*. 2016; 366–367: 338–345. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.023>.
15. Mikhailchuk N.L., Popov Yu.I., Savoskin A.N., Pudovikov O.E., Chuchin A.A. Improving the efficiency of the electric locomotive drive with a controllable converter for traction motor excitation. *Byulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij = Bulletin of Scientific Research Results*. 2023;2:104–114. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-2-104-114>. (In Russ.). EDN: DTQYEO.

16. Mikhalchuk N.L., Savoskin A.N., Chuchin A.A. Power circuit of an alternating current electric locomotive using a controlled transistor excitation converter. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*. 2022;3:18-22. (In Russ.). EDN: SOUMML.
17. Popov Yu.I., Mikhalchuk N.L., Savoskin A.N., Pudovikov O.E., Chuchin A.A. *Electric drive of an electric locomotive*. Patent RF, no. 2788223; 2023. (In Russ.). EDN: TSIOX.
18. Popov Yu.I., Mikhalchuk N.L., Savoskin A.N., Pudovikov O.E. *Automatic control method of rolling stock traction motor current*. Patent RF, no. 2787135; 2022. (In Russ.). EDN: RHJIUY.
19. Mihal'chuk N.L., Pudovikov O.E., Savos'kin A.N., Chuchin A.A. Control principles of a single-phase direct current electric locomotive with controlled excitation converters. *Elektrotehnika*. 2023;9:6-13. (In Russ.). EDN: FIJGZR.
20. Evseev V.Yu., Savos'kin A.N. Mathematical model of a commutator traction motor with separate consideration of eddy currents of the main and additional poles. *Elektrotehnika*. 2020;9:32-38. (In Russ.). EDN: QCLNPM.
21. Savos'kin A.N., Kulinich Yu.M., Alekseev A.S. Mathematical modeling of electromagnetic processes in the dynamic system "catenary system – electric locomotive". *Elektrichestvo*. 2002;2:29-35. (In Russ.). EDN: MPLOHF.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Михальчук Николай Львович,

к.т.н.,
Дирекция тяги, филиал ОАО «Российские
железные дороги»,
107174, г. Москва, Басманный тупик, 6а/4, Россия
✉ MihalchukNL@center.rzd.ru

Вклад автора

Автор выполнил аналитическую работу,
на основании полученных результатов провел
обобщение, подготовил рукопись к печати.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант
рукописи.*

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 29.08.2023 г.;
одобрена после рецензирования 07.10.2023 г.;
принята к публикации 12.10.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Nikolay L. Mikhalchuk,

Cand. Sci. (Eng.)
Joint Stock Company "Russian Railways" (JSCo "RZD"),
Directorate of Locomotive Traction,
6a/4, Basmanny tupik, Moscow, 107174, Russia
✉ MihalchukNL@center.rzd.ru

Contribution of the author

The author performed a comprehensive analysis, made
a generalization on the basis of the results obtained and
prepared the copyright for publication.

Conflict of interests

The author declare no conflicts of interests.

*The final manuscript has been read and approved
by author.*

Information about the article

The article was submitted 29.08.2023;
approved after reviewing 07.10.2023;
accepted for publication 12.10.2023.



Научная статья
УДК 621.311
EDN: OSHSWU
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-760-772

Оптимизация нормального режима работы электрической системы с возобновляемыми источниками энергии на примере Монголии

А.Г. Русина¹, Т. Осгонбаатар^{2✉}, Г.С. Бондарчук³, П.В. Матренин⁴

¹⁻⁴Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Резюме. Цель – разработка алгоритма оптимизации режимов работы электроэнергетической системы Монголии. Объектом исследований выбрана центральная энергосистема Монголии, включающая традиционные тепловые электростанции и возобновляемые источники (ветровые и солнечные электростанции). На нее приходится большая доля потребления и генерации электрической энергии в Монголии. Для минимизации финансовых расходов и потерь активной мощности при производстве электроэнергии на тепловых электростанциях был выбран метод линейного программирования, для минимизации потерь мощности – метод Ньютона. Также в работе использованы графики нагрузки каждого узла исследуемой энергосистемы для ее моделирования на основе ранговой модели. Графики нагрузки прогнозируются с помощью ансамблевых алгоритмов машинного обучения. Показано, что после оптимизации по критерию минимизации потерь мощности в сети потери электроэнергии составили 3,05% от общего электропотребления (при потерях электроэнергии в базовом варианте 3,12% и средней цене продажи тепловых электростанций 0,51 единицы). Таким образом, снижение потерь составило 0,07 процентных пункта или 2,24%. Также по критерию минимизации затрат средняя цена продажи электроэнергии составила 0,49 единицы, то есть уменьшилась на 3,92%. Средние потери электрической энергии в сети снизились на 0,6%. Экспериментально обосновано, что предложенные алгоритмы могут быть применены к оптимизации распределения мощности между тепловыми электростанциями по заданным критериям. Программная реализация предложенных алгоритмов выполнена с помощью библиотеки Pandapower на языке программирования Python, что позволяет создать единую систему предиктивной аналитики режимов работы энергосистемы.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, тепловые электростанции, возобновляемые источники энергии, прогнозирование, оптимизация

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00181).

Для цитирования: Русина А.Г., Осгонбаатар Т., Бондарчук Г.С., Матренин П.В. Оптимизация нормального режима работы электрической системы с возобновляемыми источниками энергии на примере Монголии // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 760–772. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-760-772>. EDN: OSHSWU.

POWER ENGINEERING

Original article

Optimization of normal operation mode of an electric system with renewable energy sources in Mongolia

Anastasiya G. Rusina¹, Tuvshin Osgonbaatar^{2✉}, Gleb S. Bondarchuk³, Pavel V. Matrenin⁴

¹⁻⁴Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract. This article is aimed at developing an algorithm for optimizing the operation modes of the electric power system of Mongolia, particularly the central power system that include not only conventional thermal power plants, but also renewable sources (wind and solar power plants). This power system accounts for a large share of electricity consumption and generation in Mongolia. The method of linear programming was chosen to minimize financial costs and active power

losses during power generation at thermal power plants, while Newton's method was used to minimize power losses. In addition, the article uses load schedules of each node of the studied power system for its modeling based on the ranking model. Load graphs are predicted using ensemble machine learning algorithms. After the optimization by the criterion of power loss minimization in the grid, power losses were found to be 3.05% of the total power consumption (with power losses in the basic variant of 3.12% and the average selling price of thermal power plants of 0.51 units). Thus, the reduction in losses amounted to 0.07 percentage points, or 2.24%. In terms of the cost minimization criterion, the average selling price of electricity was 0.49 units, i.e., decreased by 3.92%. Average losses of electric power in the grid decreased by 0.6%. According to empirical data, the suggested algorithms can be applied to the optimization of power distribution between thermal power plants by given criteria. The suggested algorithms are implemented using pandapower, a Python-based tool for power system analysis, thus creating a unified system of predictive analytics of power system operation modes.

Keywords: electric power system, thermal power plants, renewable energy sources, forecasting, optimization

Funding: The study was funded by the grant from the Russian Science Foundation (project no. 22-79-00181).

For citation: Rusina A.G., Osgonbaatar T., Bondarchuk G.S., Matrenin P.V. Optimization of normal operation mode of an electric system with renewable energy sources in Mongolia. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):760-772. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-760-772>. EDN: OSHSWU.

ВВЕДЕНИЕ

Энергосистема требует не только более высокой надежности и стабильности, но и эффективности. Например, минимизация производственных затрат, расхода топлива и потерь в сети влияет на эффективность энергосистемы. Кроме того, необходимо учитывать влияние на окружающую среду от производства и передачи электроэнергии. Таким образом, всегда требуется оптимальное решение для обеспечения как эффективности, так и надежности энергосистемы. Основной целью оптимизации является поиск наилучшего решения, удовлетворяющего определенным критериям при планировании режимов работы энергосистемы. Управление любой энергосистемой без оптимизации не будет в полном объеме обеспечивать максимальную экономичность режима и достаточную надежность энергоснабжения потребителей [1]. Имеется большое количество публикаций в периодической печати и материалах конференций, посвященных решению задач оптимизации, в которых достаточно подчеркивается актуальность проблемы.

Во многих работах [2–11] уделяется внимание разработке методологии оптимизации и их применению. В настоящее время используются различные методы, в общем классифицируемые как детерминированные и стохастические. Также методы можно разделить на однокритериальные и многокритериальные задачи, так как для оптимизационных задач имеют значение число и вид критериев эффективности.

Детерминированные методы более целесообразны для простых систем. Поведение простых систем предсказуемо, если известны текущие состояния ее элементов и законы преобразования информации, циркулирующей между ними. В таком случае задача

поиска наилучшего решения сводится к перебору всех возможных решений и выбору наиболее оптимального. Основными видами детерминированных методов являются линейное программирование [12, 13], нелинейное программирование, включая градиентные методы [14], метод множителей Лагранжа [15] и методы динамического программирования [16, 17]. Для энергетических задач оптимизации часто применяются методы нелинейного программирования, наибольшее распространение получили метод множителей Лагранжа и градиентные методы. В задаче оптимизации сложных или хаотических систем могут применяться стохастические методы [5, 6, 8, 18], такие как генетические алгоритмы [19–21], метод случайного поиска [22], алгоритм имитации отжига [23, 24] и другие.

В энергетике большое внимание уделяется оптимизации краткосрочных режимов энергосистемы, в том числе суточному планированию, поскольку оно является одной из главных функций диспетчерского управления и его планирования. В краткосрочной перспективе решается ряд режимных задач, в том числе выбор оптимального состава генерирующего оборудования и размещение резервов мощности на нем, распределение активной и реактивной мощностей между источниками, минимизация потерь в сетях и разработка оптимальных энергетических балансов. Также регулирование частоты и напряжения осуществляется с помощью методов оптимизации. Имеются научные и инженерные предложения по алгоритмам решения данного направления, ряд из которых предлагается ниже.

В работах [25, 26] авторы с помощью применения методов линейного программирования определили режимное условие,

которое гарантирует некоторые минимальные критерии для таких показателей, как расход топлива, затраты производства электроэнергии, воздействие на окружающую среду. Особенность работы в том, что отражено участие возобновляемых источников и традиционной тепловой электростанции с учетом соответствующих 24 ограничений. В качестве примера использования нелинейного программирования предлагается работа [15]. С помощью метода множителей Лагранжа был рассчитан оптимальный баланс электроэнергии для энергосистемы штата Джорджия, США. В данной работе представлен алгоритм снижения затрат и выбросов при выработке электроэнергии в целой энергосистеме.

В работах [18, 19] авторы поставили задачу минимизации эксплуатационных затрат теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) при выработке как электроэнергии, так и теплоэнергии. Оптимальное планирование выработки электроэнергии и тепла в системе ТЭЦ решалось с использованием нескольких стохастических методов, включая генетические алгоритмы: алгоритм роя частиц, алгоритм дифференциальной эволюции и др. Сравнительный результат показывает, что использованные алгоритмы стохастических методов могут быть применены для решения экономической и экологической диспетчеризации ТЭЦ. В работе [27] авторы использовали генетические алгоритмы, которые позволили оптимизировать конфигурацию электрической сети с распределенными источниками. Они сделали вывод, что при планировании режимов предложенный алгоритм может быть использован для минимизации затрат на покрытие потерь энергосистемы, состоящей из возобновляемых источников энергии. В работах [28, 29] для выбора варианта размещения компенсирующих установок реактивной мощности предложено использование алгоритма роевого интеллекта, а именно алгоритм роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO). Предложенный алгоритм позволил снизить потери активной мощности и стал более эффективной моделью оптимизации.

На основе работ, приведенных в списке литературных источников, можно сделать следующие выводы: детерминированные методы способны давать определенное решение в случае простых систем, но не могут обрабатывать большое количество переменных в сложном признаковом пространстве. Этот

класс методов имеет ряд недостатков, в том числе требование дифференцируемости и монотонности целевой функции, необходимость хорошего начального приближения для нахождения глобального экстремума целевой функции, требование большого времени вычисления [10, 19]. Для устранения таких недостатков разрабатываются стохастические методы на основе машинного обучения, которые могут применяться в задачах в более сложном пространстве с большим числом переменных. Стоит отметить, что при отсутствии стохастических характеристик или непредсказуемых условий не рекомендуется применять данные методы, чтобы не усложнять вычисление оптимизации. Не существует одного оптимального алгоритма для конкретной цели, и они никогда не дают наилучшего результата. Для усовершенствования моделей постоянно требуются новые подходы и модификации, что усложняет их реализацию.

В качестве объекта исследования выбрана центральная энергосистема, где расположено большинство частей генерации и потребления электроэнергии в Монголии. На данный момент установленная мощность данной энергосистемы составляет 1488 МВт, из которых 84% или 1243 МВт генерируются тепловыми электростанциями, а остальные 16%, или 245 МВт, – возобновляемыми источниками, такими как солнечные и ветровые. По статистике, в 2022 г. общая выработка электроэнергии данной энергосистемы составила 7,83 млн МВт·ч, из них 92% произведено ТЭЦ, а 8% – возобновляемыми источниками. Данная энергосистема соединилась с Единой энергетической системой (ЕЭС) России через ВЛ 220 кВ Селендума – Дархан, которая обеспечивает баланс мощности, регулировку напряжения, и показатели качества электроэнергии так же, как и в шинах бесконечной мощности. Импорт электроэнергии из России и Китая составил около 20% общего электропотребления энергосистемы [30]. В настоящее время в центральной энергосистеме отсутствуют быстроманевренные агрегаты для покрытия нерегулярной части суточного графика нагрузки, такие как гидроэлектростанция или гидроаккумулирующая электростанция.

С точки зрения будущего состояния энергосистемы среднегодовые темпы роста электропотребления составляют 7,4%. В соответствии с растущей потребностью правительство Монголии рассматривает несколько

проектов строительства электростанций в ближайшем будущем, в том числе 1150 МВт – ТЭЦ и конденсационные электростанции, а также 300 МВт – ГЭС. Для сокращения выбросов парниковых газов, связанных с энергетикой, ставится цель увеличить объем мощностей возобновляемой энергии на 30% к 2030 г. [30].

Очевидно, что по мере увеличения доли возобновляемых источников помимо потребления электроэнергии будет возникать дополнительная неопределенность на стороне производства электроэнергии. Также традиционные тепловые электростанции будут играть основную роль как в настоящем, так и в будущем. Таким образом, задача оптимального распределения активной мощности между тепловыми электростанциями с учетом возобновляемых источников энергии актуальна для объекта исследования. Целью исследования является разработка алгоритма оптимизации режимов работы центральной энергосистемы Монголии с помощью методов программирования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Целями планирования графиков выработки ТЭЦ в суточном интервале является минимизация финансовых затрат энергосистемы и потерь мощности в сети при производстве электроэнергии в определенных ограничениях. Математическая формулировка минимизации средней цены продажи электроэнергии на тепловых электростанциях имеет следующий вид:

$$C = \sum_{i=1}^N C_i(P_i) \rightarrow \min.$$

Минимизация потерь мощности в сети:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N L_i(P_i) \rightarrow \min,$$

где N – число электростанций; C_i – стоимость выработки i -й электростанции, руб/МВт; P_i – мощность i -й электростанции, МВт; ΔP – потери мощности в сети, МВт.

В случае минимизации финансового расхода единого покупателя в суточном интервале целевая функция будет определяться следующим выражением:

$$C_{CHP} \sum_{t=1}^{24} P_{CHP_t} + C_{PV} \sum_{t=1}^{24} P_{PV_t} + C_{WP} \sum_{t=1}^{24} P_{WP_t} + C_{imp} \sum_{t=1}^{24} P_{imp_t} \rightarrow \min.$$

При минимизации потерь электроэнергии

в суточном интервале целевая функция имеет следующий вид:

$$\sum_{t=1}^{24} L(P_{CHP_t}, P_{PV_t}, P_{WP_t}, P_{imp_t}, P_{load_t}) \rightarrow \min,$$

где C_{CHP} – средняя стоимость электроэнергии, выработанной на ТЭЦ, руб/МВт; P_{CHP_t} – потребляемая мощность от всех ТЭЦ в t -й час, МВт; C_{PV} – средняя стоимость электроэнергии, выработанной солнечной электростанцией (СЭС), руб/МВт; P_{PV_t} – потребляемая мощность от СЭС в t -й час, МВт; C_{WP} – средняя стоимость электроэнергии, выработанной на ветряной электростанции (ВЭС), руб/МВт; P_{PV_t} – потребляемая мощность от ВЭС в t -й час, МВт; C_{imp} – стоимость импортируемой электроэнергии из ЕЭС России, руб/МВт; P_{imp_t} – импортируемая мощность в t -й час, МВт; P_{load_t} – потребление электроэнергии в t -й час, МВт.

В общем случае мощности P_{PV} и P_{WP} , вырабатываемые возобновляемыми источниками, не могут быть отнесены к зависимым переменным в силу их природных особенностей, т.е. они не регулируются. Без учета инвестиционных затрат их стоимости C_{PV} , C_{WP} невелики, в отличие от традиционных тепловых электростанций C_{CHP} . Таким образом, мощности ТЭЦ P_{CHP} будут играть роль зависимых переменных в поставленных задачах.

В качестве уравнения ограничений должны быть наложены следующие ограничения.

По диапазону выработки каждой электростанции:

$$P_{\min_i} \leq P_i \leq P_{\max_i},$$

где P_{\min_i} – техническая минимальная мощность, МВт; P_{\max_i} – техническая максимальная мощность i -й ТЭЦ, МВт.

По потокам по ВЛ (воздушным линиям):

$$P_{\min_j}^L \leq P_j^L \leq P_{\max_j}^L, j = 1 \dots M,$$

где $P_{\min_j}^L$, $P_{\max_j}^L$ – предельные значения потоков мощности по j -й ВЛ.

По балансу мощности энергосистемы:

$$P_k^{gen} - P_k^{load} = V_k \sum_{k'=1}^K V_{k'} [G_{kk'} \cos(\delta_{kk'}) + B_{kk'} \sin(\delta_{kk'})];$$

$$Q_k^{gen} - Q_k^{load} = V_k \sum_{k'=1}^K V_{k'} [G_{kk'} \sin(\delta_{kk'}) - B_{kk'} \cos(\delta_{kk'})].$$

где $k, k' = (1 \dots K)$ – номер узлов; P_k^{gen}, Q_k^{gen} – активная и реактивная мощность на k -ом узле, МВт; P_k^{load}, Q_k^{load} – активная и реактивная нагрузка на k -ом узле, МВт; $V_k, V_{k'}$ – напряжения узлов

k и k' , В; $\delta_{kk'}$, – разность фаз напряжений узлов k и k' , рад; $G_{kk'}$, $B_{kk'}$ – проводимость и сопротивление ветви между узлами k и k' , См и Ом, соответственно.

Стоит отметить, что в задаче минимизации финансовых затрат энергосистемы необходима линеаризация уравнения баланса мощности. После линеаризации уравнение баланса мощности для центральной энергосистемы Монголии можно записать в следующем виде:

$$\sum_{t=1}^{24} P_{CHP_t} + \sum_{t=1}^{24} P_{PV_t} + \sum_{t=1}^{24} P_{WP_t} \pm \sum_{t=1}^{24} P_{FLOW_t} = \sum_{t=1}^{24} P_{LOAD_t},$$

где P_{FLOW_t} – количество перетока между центральной энергосистемой и ЕЭС России в t -й час, МВт; P_{LOAD} – потребление электроэнергии центральной энергосистемы в t -й час, МВт.

В задаче минимизации потери мощности энергосистемы не требуется линеаризация уравнения баланса мощности и других уравнений, так как метод линейного программирования неприменим и уравнение связи – нелинейное. В поставленной задаче подходят детерминированные методы, поскольку отсутствуют стохастические характеристики.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В силу особенности рыночных отношений в задаче минимизации финансовых затрат был выбран метод линейного программирования, для минимизации потерь мощности – метод Ньютона, так как имеется квадратичная характеристика.

Метод линейного программирования. При решении проблемы оптимизации, в том числе энергетических задач, наиболее распространенным методом является линейное программирование. На практике большинство процессов в энергосистеме можно описать функцией, состоящей из одной или нескольких линейных зависимостей, т.е. целевая функция и ее ограничения имеют вид линейного уравнения. В таком случае применение линейного программирования подходит для задач оптимизации [11]. В общем случае линейное программирование может быть выражено в стандартной матричной форме:

$$F(X) = aX + b \rightarrow \text{extr},$$

при ограничении

$$\begin{cases} X \leq B_1 \\ X = B_2 \\ B_3 \leq X \leq B_4 \end{cases},$$

где $F(X)$ – целевая функция; X – зависимая переменная; B – значение ограничения.

Симплекс-метод – широко используемый алгоритм из методов линейного программирования в оптимизационных задачах. Суть данного алгоритма состоит в переборе вершин выпуклого многогранника в многомерном пространстве. Математическая формулировка целевой функции имеет следующий вид:

$$F(X) = b + \sum_{i=1}^N \alpha_i X_i \rightarrow \text{extr},$$

где b – свободный член; α_i – коэффициенты.

Преимущество симплекс-метода заключается в том, что он проще в реализации и требует небольших вычислений по сравнению с другими методами, как линейными, так и нелинейными. С другой стороны, точность результата напрямую зависит от качества исходных переменных, т.е. чем хуже точность исходных переменных, тем больше погрешность модели.

Метод Ньютона второго порядка. Метод Ньютона второго порядка может использоваться в задачах поиска экстремумов функций. Метод также может быть применен для решения систем нелинейных уравнений с несколькими переменными. Алгоритм данного метода реализуется следующими шагами:

1. Задать начальное приближение x_0 для корня уравнения.
2. Вычислить значение функции $f(x)$ и ее производной $f'(x)$ в точке x_0 .
3. Вычислить значение второй производной $f''(x)$ в точке x_0 .
4. Вычислить следующее приближение x_1 для корня уравнения по формуле:

$$x_1 = x_0 - \left(\frac{f'(x_0)}{f''(x_0)} \right).$$

5. Повторять шаги 2–4 до достижения необходимой точности или заданного количества итераций.

На практике в большинстве случаев с помощью данного метода решаются задачи как минимизации потерь мощности в сетях, так и расчета установившегося режима электроэнергетической системы. В случае, когда данный метод применяется для решения задач минимизации потерь в сетях, необходимо сначала определить функцию потерь мощности и ее частные производные по переменным. Затем начальное приближение выбирается в соответствии с требованиями задачи. Далее, метод Ньютона второго порядка применяется для отыскания значения минимума функции

потерь мощности. Этот процесс итерации повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто условие сходимости или достигнута заданная точность.

Для моделирования нормального режима работы энергосистемы с использованием метода Ньютона необходимо задать начальные значения параметров электрической сети, например напряжение на узлах и состояния схемы, а затем запустить алгоритм решения системы уравнений, который будет итеративно корректировать значения параметров до достижения установившегося режима. На рис. 1 показана блок-схема алгоритма Ньютона второго порядка.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оптимизация распределения мощности между тепловыми электростанциями осуществлялась по двум вариантам, направленным на снижение потерь в

сети методом Ньютона и минимизации финансовых затрат энергосистемы методом линейного программирования. Расчеты были проведены на реальной схеме центральной энергосистемы, представленной на рис. 2. В качестве балансирующего узла выбрана подстанция Селендума, которая находится на территории России (Бурятия).

В расчете использовались фактические параметры оборудования, такого как воздушные линии, автотрансформаторы и трансформаторы. Исходные данные по источникам приведены в табл. 1.

Без суточных графиков энергопотребления как энергосистемы, так и ее узлов, а также графиков выработки возобновляемых источников, поставленная задача невыполнима. Таким образом, в данной работе использованы модели этих графиков, построенные ансамблевым алгоритмом машинного обучения и методом ранговых моделей [31].

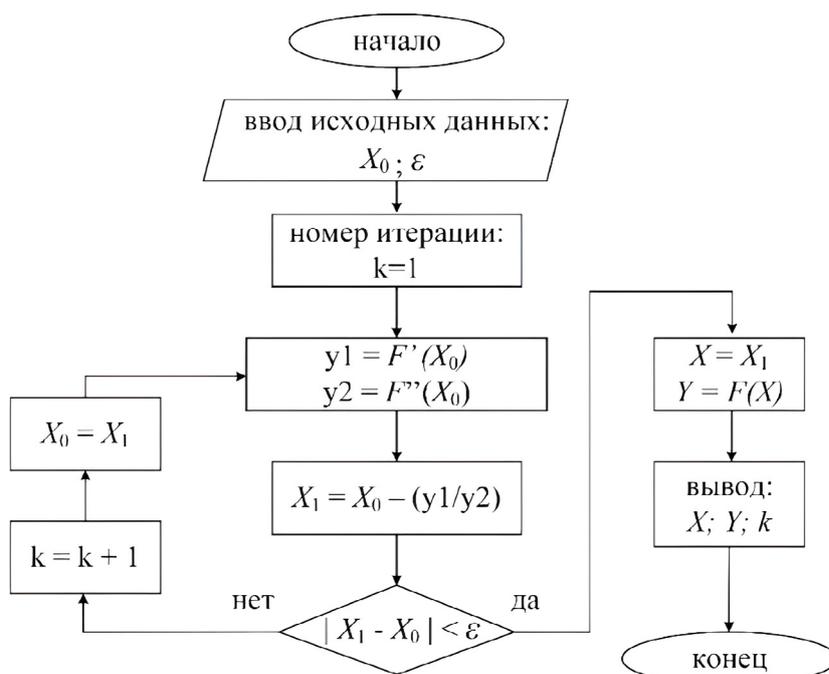


Рис. 1. Блок-схема метод Ньютона второго порядка
 Fig. 1. Newton-Raphson method block diagram

Таблица 1. Данные об электростанциях и импорте из ЕЭС России
 Table 1. Data on power plants and imports from the Russian Unified Energy System

Название	P_{\max} , МВт	P_{\min} , МВт	Цена, руб/кВт·ч	Цена / о.е.
ТЭЦ-2	22	18	1966	0,82
ТЭЦ-3	176	168	1037	0,43
ТЭЦ-4	740	500	881	0,36
ТЭЦ-Дархан	62	60	1616	0,66
ТЭЦ-Эрдэнэт	60	58	1943	0,81
ТЭЦ-ГОК	42	40	1978	0,82
Импорт	350	–	7396	3,07

Примечание: о.е. – относительные единицы, цена выработки ТЭЦ или импорта относительно среднего значения, ГОК – горнообогатительный комплекс.

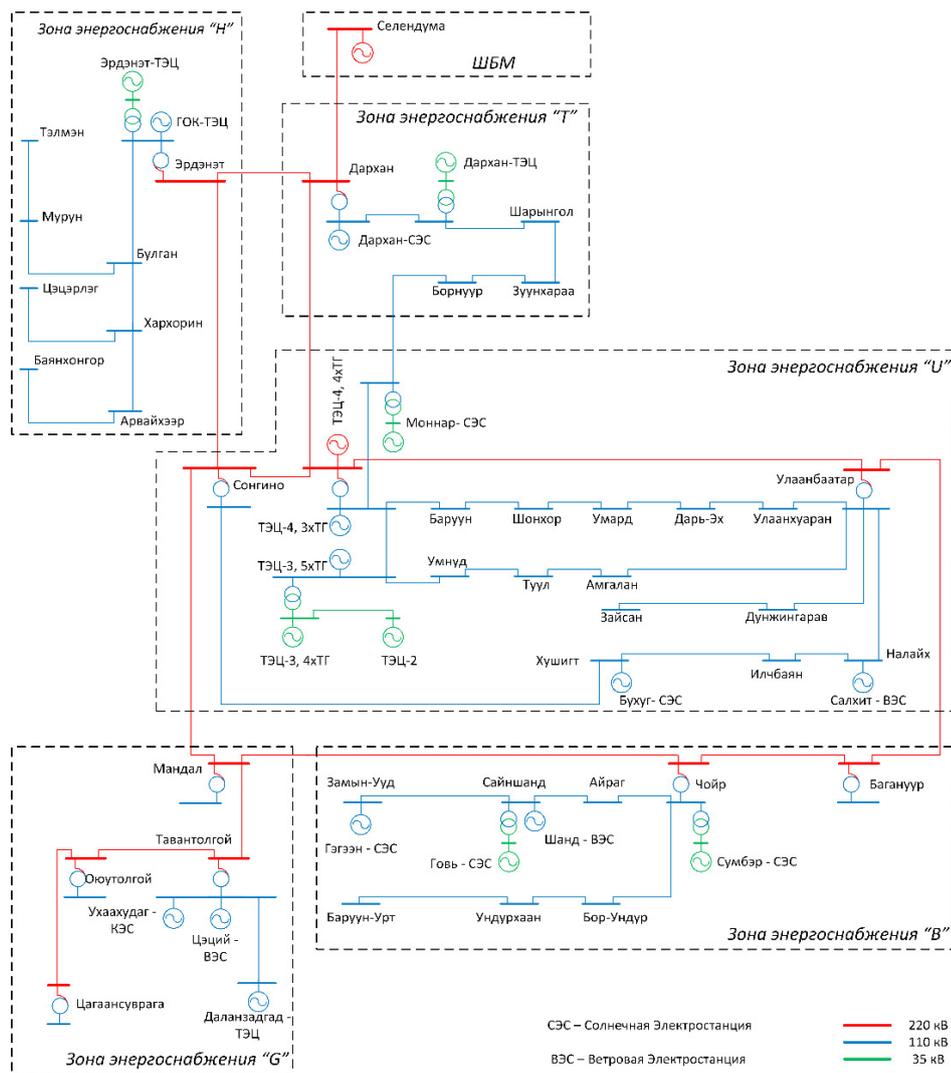


Рис. 2. Расчетная схема центральной энергосистемы Монголии
Fig. 2. Nodalization diagram of the central power system of Mongolia

Проведен эксперимент на 12-ти таких моделях суточных графиков, т.е. расчет установившегося режима проводился на 288 точках.

В первом случае активная мощность распределена между тепловыми электростанциями по действующему алгоритму на практике. Речь идет о базовой версии без оптимизации. На рис. 3 представлен график

потерь мощности рассматриваемого временного ряда.

Видно, что совпадают результаты расчетов, выполненных двумя способами. Из этого следует, что результаты ПК Rastrwin подтверждают возможность использования языка программирования Python в поставленных задачах.

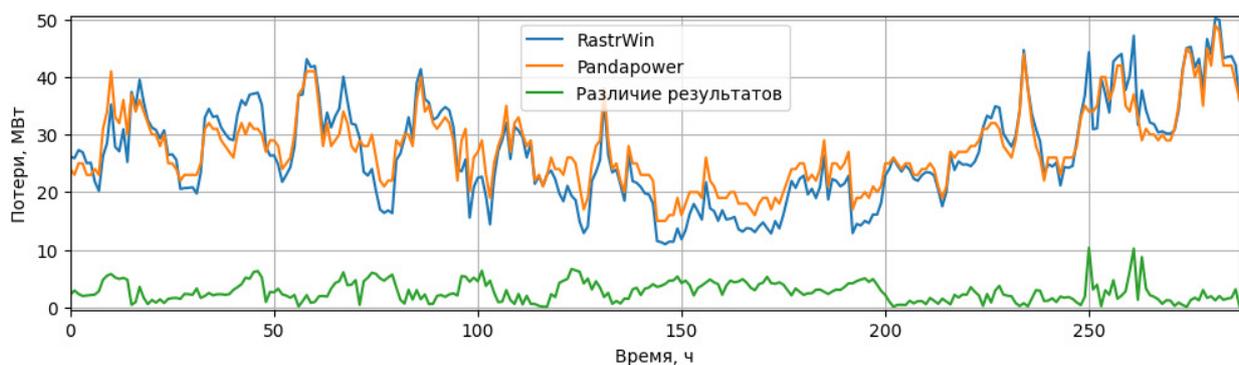


Рис. 3. График потерь мощности центральной энергосистемы
Fig. 3. Graph of central power system power losses

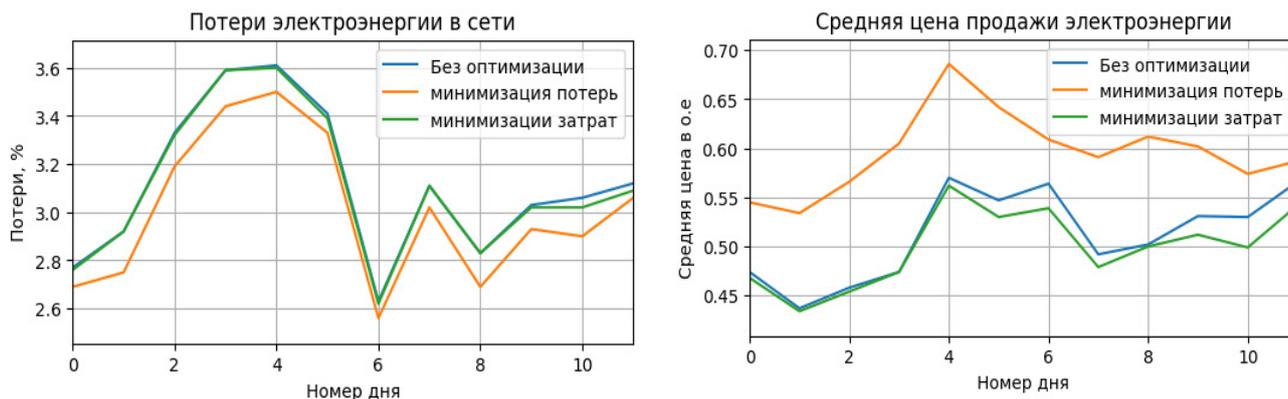


Рис. 4. График среднесуточной потери мощности и цены продажи ТЭЦ
 Fig. 4. Graph of average daily power loss and energy price

Во втором случае учтен критерий минимизации потерь в сети. Поскольку целевой функцией является минимизация потерь мощности в сети, не учитываются различия цен. Цены на ТЭЦ и на сальдо перетоков установлены в аналогичном размере. Третий сценарий. При минимизации финансовых затрат энергосистемы отдельно реализовано перераспределение в связи с линеаризацией уравнений ограничения, в частности баланса мощности. Затем был проведен расчет установившегося режима работы энергосистемы.

На рис. 4 видно, что среднесуточные потери мощности в сети снижаются после пере-

распределения по данному критерию. Но оказывается отрицательное влияние на финансовое положение. Третий сценарий позволил снизить среднюю цену на электроэнергию, вырабатываемую ТЭЦ, по сравнению с предыдущим вариантом, несмотря на это, существенного влияния на потери мощности в сети не произошло. Видно, что предложенные алгоритмы играют свою роль в поставленных задачах.

В табл. 2 приведены сравнительные результаты расчета установившегося режима, выполненного для приведенных выше сценариев.

Таблица 2. Итоговые результаты оптимизации
 Table 2. Final optimization results

Номер	Без оптимизации		По критерию минимальных потерь		По критерию минимальной затраты	
	Потеря, %	Средняя цена, о.е.	Потеря, %	Средняя цена, о.е.	Потеря, %	Средняя цена, о.е.
1	2,77	0,47	2,69	0,54	2,76	0,48
2	2,92	0,44	2,75	0,53	2,92	0,43
3	3,33	0,46	3,18	0,56	3,32	0,45
4	3,59	0,47	3,43	0,60	3,59	0,47
5	3,61	0,57	3,50	0,68	3,60	0,56
6	3,41	0,54	3,33	0,64	3,39	0,53
7	2,63	0,56	2,56	0,61	2,62	0,54
8	3,11	0,49	3,02	0,59	3,11	0,48
9	2,83	0,50	2,69	0,61	2,83	0,50
10	3,03	0,53	2,93	0,60	3,02	0,51
11	3,06	0,53	2,90	0,57	3,02	0,49
12	3,12	0,56	3,06	0,58	3,09	0,54
Результаты (среднее значение всех случаев)	3,12	0,51	3,05	0,59	3,10	0,49

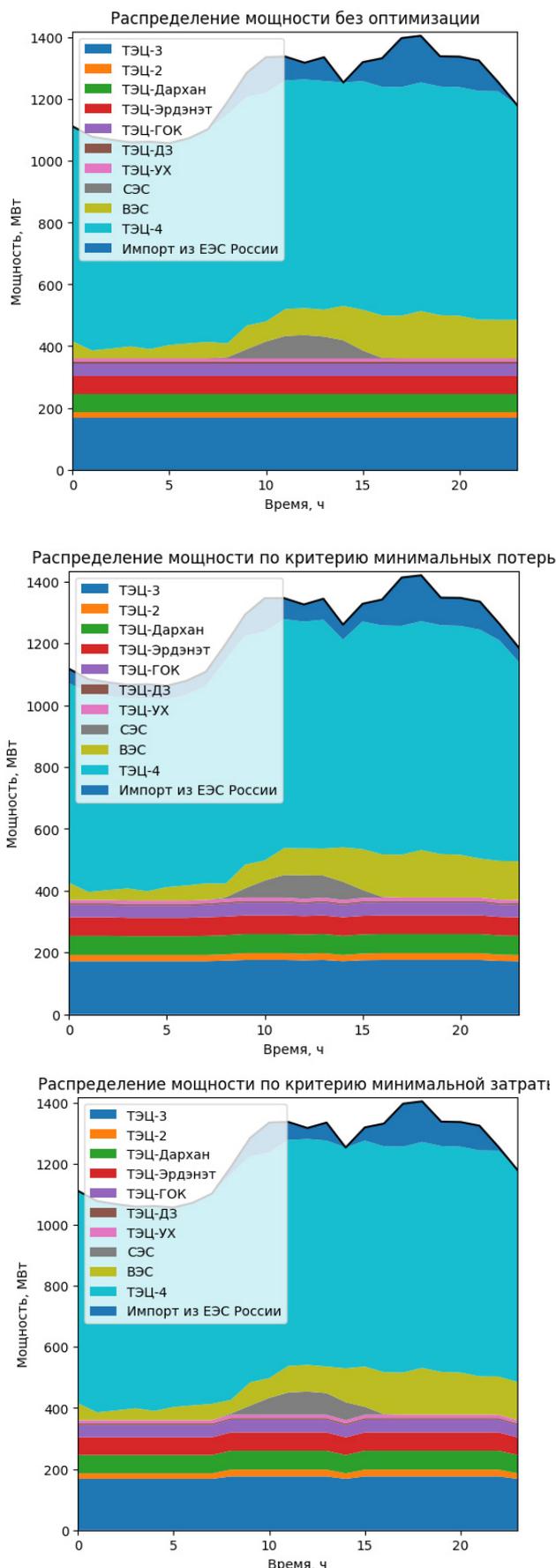


Рис. 5. Планирование суточной выработки источников
Fig. 5. Planning daily generation schedule

Также на рис. 5 представлены суточные графики, учитывающие вышеприведенные варианты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описаны особенности центральной энергосистемы Монголии с точки зрения состава генерирующих объектов. Также дан краткий обзор будущего плана данной энергосистемы. Одним из перспективных направлений развития данной энергосистемы является внедрение программных средств для планирования режимов работы, обеспечивающих надежность и эффективность энергосистемы. Поставлена цель – разработка алгоритма оптимизации нормальных режимов работы центральной энергосистемы Монголии за счет планирования графиков генерации тепловых электрических станций. Для достижения поставленной цели выдвинуты задачи, такие как минимизация потерь мощности в сети и финансовых затрат на оптовом рынке электроэнергии. Использованы детерминированные методы, в том числе линейное программирование и метод Ньютона второго порядка, поскольку отсутствуют стохастические характеристики системы. Программная реализация выполнена с помощью библиотеки Pandapower на языке программирования Python.

Эксперименты, проведенные на 12 суточных графиках, дали следующие результаты: в случае без оптимизации потери электроэнергии занимали 3,12% от общего электропотребления, а средняя цена продажи электроэнергии ТЭЦ составила 0,51 единицы. После оптимизации по критерию минимизации потерь мощности в сети данный показатель составил 3,05% от общего электропотребления. Таким образом, снижение потерь составило 0,07 процентных пункта или 2,24%. По критерию минимизации затрат средняя цена продажи электроэнергии составила 0,49 единицы, т.е. уменьшилась на 3,92%. Также средние потери электроэнергии в сети снизились на 0,02 процентных пункта или 0,6%.

Таким образом, предложенные алгоритмы могут быть применены в оптимизации распределения мощности между ТЭЦ по соответствующим критериям. Распределение активной мощности между источниками, отвечающее заданным критериям, за счет программирования станет большим вкладом в развитие центральной энергосистемы Монголии.

Список источников

1. Сидорова А.В., Черемных А.А., Русина А.Г. Python как инструмент оптимизации режима ГЭС в составе ЭЭС // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 2. С. 119–132. EDN: RXEUZU.
2. Kim Insu, Kim Beopsoo, Sidorov D. Machine learning for energy systems optimization // *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 11. P. 4116. <https://doi.org/10.3390/en15114116>.
3. Лыгин М.М., Корнилов Г.П., Кожевников И.О. Анализ современных методов оптимизации // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. тр. / под ред. С.И. Лукьянова, Е.Г. Нешпоренко. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2019. Вып. 6. С. 4–11. EDN: RRNVRC.
4. Luo Xi, Liu Yanfeng, Feng Pingan, Gao Yuan, Guo Zhenxiang. Optimization of a solar-based integrated energy system considering interaction between generation, network, and demand side // *Applied Energy*. 2021. Vol. 294. P. 116931. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116931>.
5. Niu Ming, Wan Can, Xu Zhao. A review on applications of heuristic optimization algorithms for optimal power flow in modern power systems // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2014. Vol. 2. Iss. 4. P. 289–297. <https://doi.org/10.1007/s40565-014-0089-4>.
6. Zakaria A., Ismail F., Hossain M.S., Hannan M.A. Uncertainty models for stochastic optimization in renewable energy applications // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 145. P. 1543–1571. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.081>.
7. Longo S., Montana F., Sanseverino E.R. A review on optimization and cost-optimal methodologies in low-energy buildings design and environmental considerations // *Sustainable Cities and Society*. 2019. Vol. 45. P. 87–104. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.027>.
8. Алехин Р.А., Кубарьков Ю.П., Замаков Д.В., Умяров Д.В. Обзор метаэвристических методов оптимизации, применяемых при решении электроэнергетических задач // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2019. № 3. Т. 63. С. 6–19.
9. Akbas B., Kocaman A.S., Nock D., Troffer P.A. Rural electrification: an overview of optimization methods // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 156. P. 111935. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111935>.
10. Thirunavukkarasu M., Sawle Y., Lala H. A comprehensive review on optimization of hybrid renewable energy systems using various optimization techniques // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 176. P. 113192. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113192>.
11. Alabi T.M., Aghimien E.I., Agbajor F.D., Yang Zaiyue, Lu Lin, Adeoye A.R., Gopaluni B. A review on the integrated optimization techniques and machine learning approaches for modeling, prediction, and decision making on integrated energy systems // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 194. P. 822–849. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.123>.
12. Manusov V., Beryozkina S., Nazarov M., Safaraliev M., Zicmane I., Matrenin P. Optimal management of energy consumption in an autonomous power system considering alternative energy sources // *Mathematics*. 2022. Vol. 10. Iss. 3. P. 525. <https://doi.org/10.3390/math10030525>.
13. Альсова О.К., Артамонова А.В. Многокритериальная модель планирования водно-энергетических режимов Новосибирской ГЭС // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19. № 6. С. 112–117.
14. Woo Jong Ha, Wu Lei, Park Jong-Bae, Roh Jae Hyung. Real-time optimal power flow using twin delayed deep deterministic policy gradient algorithm // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 213611–213618. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3041007>.
15. Jo Haesung, Park Jaemin, Kim Insu, Haesung Jo. Environmentally constrained optimal dispatch method for combined cooling, heating, and power systems using two-stage optimization // *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 14. P. 4135. <https://doi.org/10.3390/en14144135>.
16. Zhang Ning, Hu Zhaoguang, Dai Daihong, Dang Shuping, Yao Mingtao, Zhou Yuhui. Unit commitment model in smart grid environment considering carbon emissions trading // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015. Vol. 7. Iss. 1. P. 420–427. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2401337>.
17. Hussen K., Koch S., Ulbig A., Andersson G. Energy storage in power system operation: The power nodes modeling framework // *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*. 2010. <https://doi.org/10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638865>.
18. Nazari-Heris M., Mohammadi-Ivatloo B., Gharehpetian G.B. A comprehensive review of heuristic optimization algorithms for optimal combined heat and power dispatch from economic and environmental perspectives // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81. P. 2128–2143. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.024>.
19. Поляхов Н.Д., Приходько И.А., Рубцов И.А., Швыров И.В. Оптимизация распределения потоков мощности в энергосистеме с помощью генетических алгоритмов // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3. С. 170. EDN: PAAFDB.
20. Park Jaemin, Jo Haesung, Kim Insu. The selection of the most cost-efficient distributed generation type for a combined cooling heat and power system used for metropolitan residential customers // *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 18. P. 5606. <https://doi.org/10.3390/en14185606>.
21. Lambora A., Gupta K., Chopra K. Genetic algorithm-A literature review // *International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (Faridabad, 14–16 February)*. Faridabad: IEEE, 2019. P. 380–384.

<https://doi.org/10.1109/COMITCon.2019.8862255>.

22. Клер А.М., Корнеева З.Р., Елсуков П.Ю. Оптимизация режимов энергосистем, включающих ТЭЦ и ГЭС, с использованием дерева сочетаний условий функционирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. № 7. С. 170–175.

23. Sulaiman M.H., Mustaffa Z. Solving optimal power flow problem with stochastic wind–solar–small hydro power using barnacles mating optimizer // *Control Engineering Practice*. 2021. Vol. 106. P. 104672. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104672>.

24. Manusov V.Z., Matrenin P.V., Khasanzoda N. Swarm algorithms in dynamic optimization problem of reactive power compensation units control // *International Journal of Electrical & Computer Engineering*. 2019. Vol. 9. Iss. 5. P. 3967–3974. <https://doi.org/10.11591/ijece.v9i5.pp3967-3974>.

25. Rabe M., Bilan Yu., Widera K., Vasa L. Application of the linear programming method in the construction of a mathematical model of optimization distributed energy // *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 5. P. 1872. <https://doi.org/10.3390/en15051872>.

26. Gbadamosi S.L., Nwulu N.I. Optimal power dispatch and reliability analysis of hybrid CHP-PV-wind systems in farming applications // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Iss. 19. P. 8199. <https://doi.org/10.3390/su12198199>.

27. Брамм А.М., Хальясмаа А.И., Ерошенко С.А., Матренин П.В., Попкова Н.А., Секацкий Д.А. Оптимизация топологии сети с ВИЭ-генерацией на основе модифицированного адаптированного генетического алгоритма // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2022. Т. 65. № 4. С. 341–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-341-354>.

28. Манусов В.З., Матренин П.В., Третьякова Е.С. Оптимизация размещения источников реактивной мощности с помощью алгоритма роя частиц с генетической адаптацией // Промышленная энергетика. 2016. № 8. С. 34–40. EDN: WMRCLZ.

29. Manusov V.Z., Matrenin P.V., Ahyoev J.S., Atabaeva L.Sh. Optimization of power distribution networks in megacities // *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2017. Vol. 72. Iss. 1. P. 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/72/1/012019>.

30. Matrenin P.V., Osgonbaatar T., Sergeev N.N. Overview of renewable energy sources in Mongolia // *IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences*. 2022. P. 700–703. <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016986>.

31. Osgonbaatar T., Matrenin P., Safaraliev M., Zicmane I., Rusina A., Kokin S. A rank analysis and ensemble machine learning model for load forecasting in the nodes of the central Mongolian power system // *Inventions*. 2023. Vol. 8. Iss. 5. P. 114. <https://doi.org/10.3390/inventions8050114>.

References

1. Sidorova A.V., Cheremnykh A.A., Rusina A.G. Python as a tool for optimization the HPP mode in the composition of the EPS. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2021;13(2):119-132. EDN: RXEUZU.

2. Kim Insu, Kim Beopsoo, Sidorov D. Machine learning for energy systems optimization. *Energies*. 2022;15(11):4116. <https://doi.org/10.3390/en15114116>.

3. Lygin M.M., Kornilov G.P., Kozhevnikov I.O. Analysis of modern methods of optimization of power plants. In: Luk'yanova S.I., Neshporenko E.G. (eds.). *Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy: mezhdunarodnyj sbornik nauchnyh trudov = Energy and electrical systems: international collection of scientific works*. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical; 2019, iss. 6, p. 4-11. EDN: RRNVRC. (In Russ.).

4. Luo Xi, Liu Yanfeng, Feng Pingan, Gao Yuan, Guo Zhenxiang. Optimization of a solar-based integrated energy system considering interaction between generation, network, and demand side. *Applied Energy*. 2021;294:116931. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116931>.

5. Niu Ming, Wan Can, Xu Zhao. A review on applications of heuristic optimization algorithms for optimal power flow in modern power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2014;2(4):289-297. <https://doi.org/10.1007/s40565-014-0089-4>.

6. Zakaria A., Ismail F., Hossain M.S., Hannan M.A. Uncertainty models for stochastic optimization in renewable energy applications. *Renewable Energy*. 2020;145:1543-1571. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.081>.

7. Longo S., Montana F., Sanseverino E.R. A review on optimization and cost-optimal methodologies in low-energy buildings design and environmental considerations. *Sustainable Cities and Society*. 2019;45:87-104. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.027>.

8. Alekhin R.A., Kubarkov Yu.P., Zamakov D.V., Umyarov D.V. Overview of metaheuristic optimization techniques applied to solving power engineering problems. *Vestnik SibADI = The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;3(63):6-19. (In Russ.).

9. Akbas B., Kocaman A.S., Nock D., Troffer P.A. Rural electrification: an overview of optimization methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;156:111935. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111935>.

10. Thirunavukkarasu M., Sawle Y., Lala H. A comprehensive review on optimization of hybrid renewable energy systems using various optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023;176:113192. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113192>.

org/10.1016/j.rser.2023.113192.

11. Alabi T.M., Aghimien E.I., Agbajor F.D., Yang Zaiyue, Lu Lin, Adeoye A.R., Gopaluni B. A review on the integrated optimization techniques and machine learning approaches for modeling, prediction, and decision making on integrated energy systems. *Renewable Energy*. 2022;194:822-849. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.123>.
12. Manusov V., Beryozkina S., Nazarov M., Safaraliev M., Zicmane I., Matrenin P. Optimal management of energy consumption in an autonomous power system considering alternative energy sources. *Mathematics*. 2022;10(3):525. <https://doi.org/10.3390/math10030525>.
13. Al'sova O.K., Artamonova A.V. Multi-objective model for planning water-energy modes of Novosibirsk hydro power plant. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2017;19(6):112-117. (In Russ.).
14. Woo Jong Ha, Wu Lei, Park Jong-Bae, Roh Jae Hyung. Real-time optimal power flow using twin delayed deep deterministic policy gradient algorithm. *IEEE Access*. 2020;8:213611-213618. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3041007>.
15. Jo Haesung, Park Jaemin, Kim Insu, Haesung Jo. Environmentally constrained optimal dispatch method for combined cooling, heating, and power systems using two-stage optimization. *Energies*. 2021;14(14):4135. <https://doi.org/10.3390/en14144135>.
16. Zhang Ning, Hu Zhaoguang, Dai Daihong, Dang Shuping, Yao Mingtao, Zhou Yuhui. Unit commitment model in smart grid environment considering carbon emissions trading. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015;7(1):420-427. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2401337>.
17. Hussen K., Koch S., Ulbig A., Andersson G. Energy storage in power system operation: The power nodes modeling framework. In: *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*. 2010. <https://doi.org/10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638865>.
18. Nazari-Heris M., Mohammadi-Ivatloo B., Gharehpetian G.B. A comprehensive review of heuristic optimization algorithms for optimal combined heat and power dispatch from economic and environmental perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;81:2128-2143. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.024>.
19. Polyakhov N.D., Prikhodko I.A., Rubtsov I.A., Shvyrov I.V. Optimal power flow by genetic algorithm for power systems. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*. 2012;3:170. (In Russ.). EDN: PAAFDB.
20. Park Jaemin, Jo Haesung, Kim Insu. The selection of the most cost-efficient distributed generation type for a combined cooling heat and power system used for metropolitan residential customers. *Energies*. 2021;14(18):5606. <https://doi.org/10.3390/en14185606>.
21. Lambora A., Gupta K., Chopra K. Genetic algorithm-A literature review. In: *International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing*. 14–16 February, Faridabad. Faridabad: IEEE; 2019, p. 380-384. <https://doi.org/10.1109/COMITCon.2019.8862255>.
22. Kler A.M., Korneeva Z.R., Elsukov P.Yu. Optimization of modes of power systems including heat stations and hydro-power stations with the use of the combination tree of operating conditions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Irkutsk State Technical University*. 2010;7(47):170-175. (In Russ.).
23. Sulaiman M.H., Mustafa Z. Solving optimal power flow problem with stochastic wind-solar-small hydro power using barnacles mating optimizer. *Control Engineering Practice*. 2021;106:104672. <https://doi.org/10.1016/j.coneng-prac.2020.104672>.
24. Manusov V.Z., Matrenin P.V., Khasanzoda N. Swarm algorithms in dynamic optimization problem of reactive power compensation units control. *International Journal of Electrical & Computer Engineering*. 2019;9(5):3967-3974. <https://doi.org/10.11591/ijece.v9i5.pp3967-3974>.
25. Rabe M., Bilan Yu., Widera K., Vasa L. Application of the linear programming method in the construction of a mathematical model of optimization distributed energy. *Energies*. 2022;15(5):1872. <https://doi.org/10.3390/en15051872>.
26. Gbadamosi S.L., Nwulu N.I. Optimal power dispatch and reliability analysis of hybrid CHP-PV-wind systems in farming applications. *Sustainability*. 2020;12(19):8199. <https://doi.org/10.3390/su12198199>.
27. Bramm A.M., Khalyasmaa A.I., Eroshenko S.A., Matrenin P.V., Papkova N.A., Sekatski D.A. Topology optimization of the network with renewable energy sources generation based on a modified adapted genetic algorithm. In: *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh ob"edinenij SNG. Energetika = Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2022;65(4):341-354. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-341-354>.
28. Manusov V.Z., Matrenin P.V., Tret'yakova E.S. Reactive power source placement optimization using particle swarm algorithm and genetic adaptation. *Promyshlennaya energetika*. 2016;8:34-40. (In Russ.). EDN: WMRCLZ.
29. Manusov V.Z., Matrenin P.V., Ahyoev J.S., Atabaeva L.Sh. Optimization of power distribution networks in megacities. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2017;72(1):012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/72/1/012019>.
30. Matrenin P.V., Osgonbaatar T., Sergeev N.N. Overview of renewable energy sources in Mongolia. In: *IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences*. 2022;700-703. <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016986>.
31. Osgonbaatar T., Matrenin P., Safaraliev M., Zicmane I., Rusina A., Kokin S. A rank analysis and ensemble machine

learning model for load forecasting in the nodes of the central Mongolian power system. *Inventions*. 2023;8(5):114. <https://doi.org/10.3390/inventions8050114>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Русина Анастасия Георгиевна,
д.т.н., доцент,
заведующий кафедрой электрических станций,
Новосибирский государственный
технический университет,
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия
anastasiarusina@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2591-4162>

Осгонбаатар Тувшин,
аспирант,
Новосибирский государственный
технический университет,
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия
o.tuvshin.21@gmail.com

Бондарчук Глеб Сергеевич,
студент,
Новосибирский государственный
технический университет,
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия
djgleban1147@gmail.com

Матрёнин Павел Викторович,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры систем электроснабжения
предприятий,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия
pavel.matrenin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 02.09.2023 г.;
одобрена после рецензирования 30.10.2023 г.;
принята к публикации 03.11.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anastasiya G. Rusina,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Power Plants Department,
Novosibirsk State Technical University,
20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk 630073, Russia
anastasiarusina@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2591-4162>

Tuvshin Osgonbaatar,
Postgraduate Student,
Novosibirsk State Technical University,
20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk 630073, Russia
o.tuvshin.21@gmail.com

Gleb S. Bondarchuk,
Student,
Novosibirsk State Technical University,
20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk 630073, Russia
djgleban1147@gmail.com

Pavel V. Matrenin,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Industrial Power
Supply Systems,
Novosibirsk State Technical University,
20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk 630073, Russia
pavel.matrenin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>

Contribution of the authors

All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 02.09.2023;
approved after reviewing 30.10.2023;
accepted for publication 03.11.2023.



Обзорная статья
УДК 338.4:621.31
EDN: SNZFCN
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-773-789

Обзор методов моделирования и управления киберфизическими системами в мультиэнергетических микросетях

Н.В. Томин¹, А.В. Домышев², Е.А. Барахтенко³, В.А. Шакиров⁴, А.Н. Козлов⁵,
И.К. Сосновский⁶✉, Фанг Лю⁷, Д.Н. Сидоров⁸

^{1-6,8}Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

⁷Центральный южный университет, г. Чанша, Китай

Резюме. Цель – провести анализ развития методов моделирования и управления мультиэнергетическими микросетями с позиции использования киберфизических систем. Для проведения исследования были использованы методы литературного обзора и мета-анализа в области моделирования и управления киберфизическими системами в мультиэнергетических микросетях на основе опубликованных статей, входящих в международные базы данных Scopus, Web of Science, Elibrary, IEEE Xplore и других источников информации. Проведенный анализ показывает, что текущее развитие киберфизических систем идет по пути внедрения концепции интеллектуальных электрических сетей. В данном исследовании резюмируется, что интерфейсы управления, каналы передачи данных и удаленные порты отладки являются уязвимыми частями устройств интернета вещей IoT, которые могут быть потенциально атакованы злоумышленниками. Проведенный анализ опубликованных работ в последние годы в рассматриваемом направлении указывает на то, что мультиагентные технологии представляются эффективным подходом не только для оперативного управления режимами мультиэнергетической микросети, но и для построения ее надежной информационной сети на уровне систем среднего и низкого напряжений. Обзор информационных технологий в области систем распределенной энергетики показывает, что чем больше добавляется возможностей по приему и обработке различного рода информации (данные по транзакциям, параметры режима, статус контролеров и т.п.) из внешних источников, тем более уязвима мультиэнергетическая микросеть к киберугрозам. Для эффективного решения задачи распределения нагрузки между различными энергоисточниками с минимизацией затрат необходимо использовать современные математические методы, такие как искусственный интеллект, динамическая оптимизация и мультиагентные подходы.

Ключевые слова: киберфизическая система, мультиэнергетические микросети, моделирование и управление

Финансирование: Исследование выполнено в рамках гранта Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2022-1215) с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (проект № 13. ЦКП. 21.0038).

Для цитирования: Томин Н.В., Домышев А.В., Барахтенко Е.А., Шакиров В.А., Козлов А.Н., Сосновский И.К., Лю Фанг, Сидоров Д.Н. Обзор методов моделирования и управления киберфизическими системами в мультиэнергетических микросетях // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 773–789. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-773-789>. EDN: SNZFCN.

POWER ENGINEERING

Review article

Review of methods for modeling and control of cyber-physical systems in multi-energy microgrids

Nikita V. Tomin¹, Alexander V. Domyshev², Evgeniy A. Barakhtenko³,
Vladislav A. Shakirov⁴, Alexander N. Kozlov⁵, Ilya K. Sosnovsky⁶✉, Fang Liu⁷,
Denis N. Sidorov⁸

^{1-6,8}Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

⁷Central South University, Changsha, China

Abstract. The article analyzes the development of methods for modeling and control of multi-energy microgrids through cyber-physical systems. We used the methods of literature review and meta-analysis based on publications from

international databases Scopus and Web of Science, Russian database eLibrary, digital platform IEEEExplore et al. According to the analysis, Smart Grid implementation drives the development of cyber-physical systems. As summarized in this study, control interfaces, data transmission channels, and remote debugging ports are vulnerable parts of IoT devices that can possibly be attacked by intruders. A review of the recent publications in this field finds multi-agent technologies to be an effective approach not only for the operational control of multi-energy microgrid modes, but also for the construction of its reliable information network at the level of medium and low voltage systems. In the field of distributed energy systems, literature review of information technology indicates that the more capabilities are added to receive and process various kinds of information (transaction data, mode parameters, status of controllers, etc.) from external sources, the more vulnerable a multi-energy microgrid is to any cyber threats. Modern mathematical methods such as artificial intelligence, dynamic optimization, and multi-agent approaches should be used to effectively solve the problem of load distribution between different energy sources with cost minimization.

Keywords: cyber-physical system, multi-energy microgrids, modeling and control

Funding: The study is funded by the grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 075-15-2022-1215) using the resources of the High Temperature Contour Resource Sharing Centre (project No. 13.RSC.21.0038).

For citation: Tomin N.V., Domyshev A.V., Barakhtenko E.A., Shakirov V.A., Kozlov A.N., Sosnovskiy I.K., Liu Fang, Sidorov D.N. Review of methods for modeling and control of cyber-physical systems in multi-energy microgrids. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):773-789. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-773-789>. EDN: SNZFCN.

Список сокращений

ВИЭ – возобновляемые источники энергии
ЭС – электроэнергетическая система
МЭМС – мультиэнергетическая микросеть
ВЭУ – ветроэлектрические установки
СЭС – солнечные электростанции
ТЭЦ – комбинированные тепло- и электростанции
АКБ – аккумуляторные батареи
ВЭН – водородные накопители энергии

ТЭН – тепловые накопители энергии
СН – система накопителей
ФЭП – фотоэлектрические преобразователи
V2G – vehicle-to-grid
P2G – power-to-grid
FACTS – Flexible AC transmission system
IoT – Internet of Things
WSN – wireless sensor networks

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих странах развивается концепция интеллектуальных («умных») электрических сетей (Smart Grids) [1, 2]. Развитие умных электрических сетей основано на применении современных технологий и компьютерных систем управления для более точного контроля и управления производством, распределением и потреблением электроэнергии. Они объединяют в себе различные силовые элементы энергетической системы, такие как электростанции, подстанции, счетчики и домашние энергетические системы, с целью обеспечения более гибкого и эффективного функционирования сети. Благодаря современным информационно-коммуникационным технологиям управление ЭЭС становится более автоматизированным и гибким.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ЭНЕРГОСИСТЕМ И НЕОБХОДИМОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И МУЛЬТИЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Комплексные вычислительные алгоритмы и машинное обучение позволяют оптимизировать работу электрической сети, предсказывать изменения потребления и принимать соответствующие решения. Регулирующие устройства

позволяют потребителям активно управлять своим электропотреблением, что может способствовать снижению нагрузки на сеть в пиковые часы.

Также разработка интеллектуальных сетей учитывает использование возобновляемой и малой распределенной генерации. Это позволяет не только увеличить долю возобновляемых источников энергии, но и более эффективно.

В результате развитие умных сетей может привести к более эффективному использованию электроэнергии, снижению нагрузки на сеть, более точному и предсказуемому управлению системой, а также интеграции возобновляемых источников энергии.

Развитие данной концепции и поиск новых энергоресурсов мотивировано такими проблемами, как нехватка традиционных энергоресурсов, глобальная озабоченность изменением климата и энергетический кризис, связанный с глобальным экономическим развитием и производством [3, 4]. Выработка электроэнергии и снабжение различных нагрузок с помощью локально доступных возобновляемых источников энергии привели к появлению новой концепции под названием микросеть [5]. Внедрение новых распределенных энергетических ресурсов с различными

системами выработки и хранения возобновляемой энергии в микросетях повлияло на значительные изменения в традиционных энергетических системах [6].

Микросети, как правило, работают не независимо, а соединены с энергосистемой на уровне распределительной сети. Работа микросети совместно с энергосистемой позволяет даже в случае достаточности локальных энергоресурсов обеспечить оптимальность работы, как на локальном уровне, так и использовать ресурс микросети для оптимального управления на уровне энергосистемы [7, 8]. При этом бурное развитие технологий микросетей требует значительных усилий для решения многочисленных экономических, коммерческих и технических проблем. В [9] показано, что микросети могут существенно повысить надежность и экономичность энергоснабжения конечных потребителей, а системы управления энергопотреблением микросетей являются критическими компонентами, которые могут помочь микросетям реализоваться.

Мультиэнергетическая микросеть (МЭМС) в общем виде обычно объединяет как различные распределенные источники электро-, тепло-, холодо- и газоснабжения (рис. 1), такие как ветроэлектрические установки (ВЭУ), солнечные электростанции (СЭС), микротурбины, комбинированные тепло- и электростанции (ТЭЦ), аккумуляторные накопители энергии, тепловые накопители энергии (ТЭН) и водородные накопители энергии (ВЭН) [10], так и ряд технологий преобразования энергии: двуна-

правленной зарядки (V2G), преобразования электроэнергии в газ (P2G) и т.п. В тоже время современные МЭМС – это киберфизические системы с внедрением передовых информационных и коммуникационных технологий для широкомасштабной многосторонней координации [11]. При объединении нескольких территориально близких МЭМС могут возникать более сложные информационно-энергетические структуры – энергетические сообщества, когда отдельные потребители имеют возможность обмениваться излишками энергии, производимой в том числе с использованием возобновляемых источников (ВИЭ) [12]. В связи с этим для эффективной работы МЭМС с использованием ВИЭ необходимо разработать новые методы управления, которые учитывают нестабильность генерации энергии. Одним из таких методов является управление с учетом прогноза погодных условий, которое позволяет адаптировать работу МЭМС в зависимости от ожидаемых изменений в генерации ВИЭ.

Также для обеспечения устойчивой работы МЭМС с большой долей ВИЭ можно использовать энергетические хранилища, такие как аккумуляторы или системы хранения водорода. Эти устройства позволяют сохранять излишки энергии, производимой ВИЭ, и использовать ее в периоды недостатка генерации.

Для оптимизации работы МЭМС с большой долей ВИЭ также могут применяться алго-

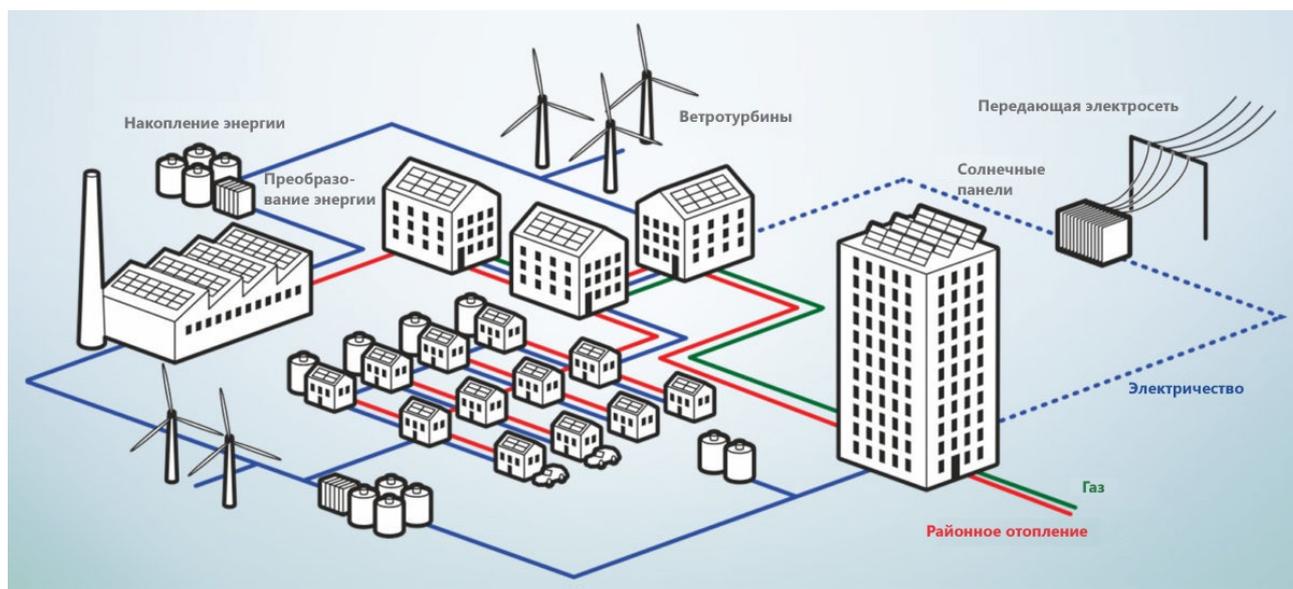


Рис. 1. Общая структура типичной мультиэнергетической микросети
Fig. 1. General structure of a typical multi-energy microgrid

ритмы прогнозирования спроса на энергию и управления с применением искусственного интеллекта. Эти алгоритмы позволяют прогнозировать пиковые нагрузки энергии и распределять ресурсы МЭМС в зависимости от предполагаемого спроса.

Таким образом, управление МЭМС с большой долей ВИЭ требует разработки специализированных методов, которые учитывают нестабильность генерации энергии. Эти методы позволяют обеспечить устойчивую работу МЭМС и максимально эффективное использование ВИЭ [13].

Стоит отметить, что на сегодняшний день существенную стохастическую составляющую в поведение МЭМС и всей электрической сети вносят электромобили.

Подключение электромобилей к электрической сети может вносить дополнительные риски и вызывать проблемы с нагрузкой на сеть, особенно если зарядка происходит нескоординированно и на высокой мощности. Этот эффект может быть усилен в МЭМС, т.к. их мощность обычно невелика, а внезапный и значительный прирост потребления электроэнергии может вызывать локальные проблемы с режимами сети.

Множеством исследований в области влияния зарядки электромобилей на электрические сети, включая МЭМС, рассматриваются модели процесса зарядки электромобилей в определенных местах сети – детерминированный подход [14–18]. Это позволяет анализировать потенциальные риски и проблемы на местах с высокой концентрацией зарядных станций и предоставляет рекомендации по оптимизации процесса зарядки и управлению нагрузкой.

Кроме того, оптимизация мест установки зарядных станций также является важным аспектом, поскольку правильное размещение зарядных инфраструктур может сократить нагрузку на электропередачу и предотвратить возможные проблемы с неравномерным распределением нагрузки. Исследования по оптимальному размещению зарядных станций помогают определить области с наибольшим спросом на зарядки и спрогнозировать необходимость инфраструктуры в этих местах.

В целом детерминированный подход, моделирование процесса зарядки и оптимизация размещения зарядных станций важны для анализа и управления влиянием электромобилей на электрические сети, включая МЭМС. Они помогают предотвратить нагрузочные

ситуации и эффективно интегрировать электромобили в энергетическую систему [19, 20].

Важным вопросом для управления режимами электроэнергетических систем являются вероятностные модели определения загрузки электрических сетей с учетом влияния зарядных станций электромобилей [21–23]. Недавно технология Vehicle To Grid (V2G), которая позволяет электромобилем выдавать электроэнергию в сеть, стала предметом увеличенного интереса. Она позволяет компенсировать негативное влияние электрического транспорта на работу электрической сети и увеличивает гибкость системы. Работы по V2G касаются алгоритмов оптимизации и управления зарядкой электротранспорта, стимулирующих пользователей отдавать энергию в сеть, когда это необходимо [24–27].

СОВРЕМЕННЫЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ МУЛЬТИЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ

По теме управления МЭМС к настоящему времени опубликовано множество научных работ, например, высокого качества обзорные статьи [28–36]. Несмотря на разнообразие предлагаемых решений, задачи управления МЭМС можно обобщить до следующих:

- управление распределенной генерацией и активной нагрузкой по экономическим критериям;
- оптимальное управление нормальными режимами МЭМС;
- обеспечение устойчивости МЭМС;
- планирование развития и ремонтов МЭМС с учетом энергетической гибкости и надежности.

Первые две из представленных задач достаточно близки и касаются управления нормальными режимами мультиэнергетической сети. В первом случае задача заключается в получении оптимального графика использования источников энергии для удовлетворения ожидаемого спроса на энергию. При ее решении необходимо учитывать системные условия и ограничения, затраты, а также ограничения генерирующего оборудования. Для МЭМС это относится к оптимальному использованию каждого энергетического блока с целью удовлетворения спроса на различные виды энергии с минимизацией общих эксплуатационных затрат. Вторая задача в основном выполняется за счет управляющих воздействий в самой сети (как микросети, так

и питающей распределительной сети). Этими воздействиями могут быть: изменения коэффициентов трансформации, топологическое переконфигурирование сети коммутационными аппаратами, изменение проводимостей компенсирующих устройств, воздействия устройствами FACTS. Другими словами, эту задачу можно рассматривать как задачу определения оптимального потокораспределения, которая состоит в распределении нагрузки между источниками энергии с целью минимизации затрат на ее производство или потерь мощности в сети, учитывая ограничения системы транспорта энергии. При этом необходимо принимать во внимание потребность в различных видах энергии, которая может удовлетворяться путем использования различных энергоисточников и устройств преобразования энергии с учетом сетевых ограничений для каждого вида энергоносителя.

Управление МЭМС связано с необходимостью обеспечения устойчивого энергоснабжения потребителей и своевременного удовлетворения спроса на различные виды энергии. Оптимальная стратегия управления МЭМС позволяет обеспечить эффективное снабжение энергией потребителей. Можно выделить два следующих подхода к организации управления МЭМС (рис. 2):

– централизованная структура управления;

– распределенная структура управления.

В [36] авторами предлагается подход, обеспечивающий иерархическое централизованное управление МЭМС. В этом подходе контроллер одновременно управляет системами тепло-, газо- и электроснабжения. Учет динамических характеристик различных систем выполняется в соответствии с тремя уровнями: медленный, средний и быстрый. При этом реализуется координированное управление различными системами энергоснабжения, в том числе в ситуациях, когда в энергосистеме происходят изменения ее состояний, связанные с изменениями режимов работы, колебаниями выработки энергии от ВИЭ, пусками различного оборудования (например, кондиционеры и микротурбины), реакцией на текущий спрос, а также с аккумулярованием электро- и теплоэнергии. Результаты этого исследования получили развитие для управления городской МЭМС [38]. Подобный подход применяется к решению задачи планирования режимов [39], где оптимизация выполняется для временного периода, равного суткам. При этом стратегия управления в режиме реального времени компенсирует несоответствие между запланированной и реальной нагрузкой путем реализации требуемых управляющих воздействий в МЭМС.

Централизованная структура управления может обеспечить эффективность функцио-

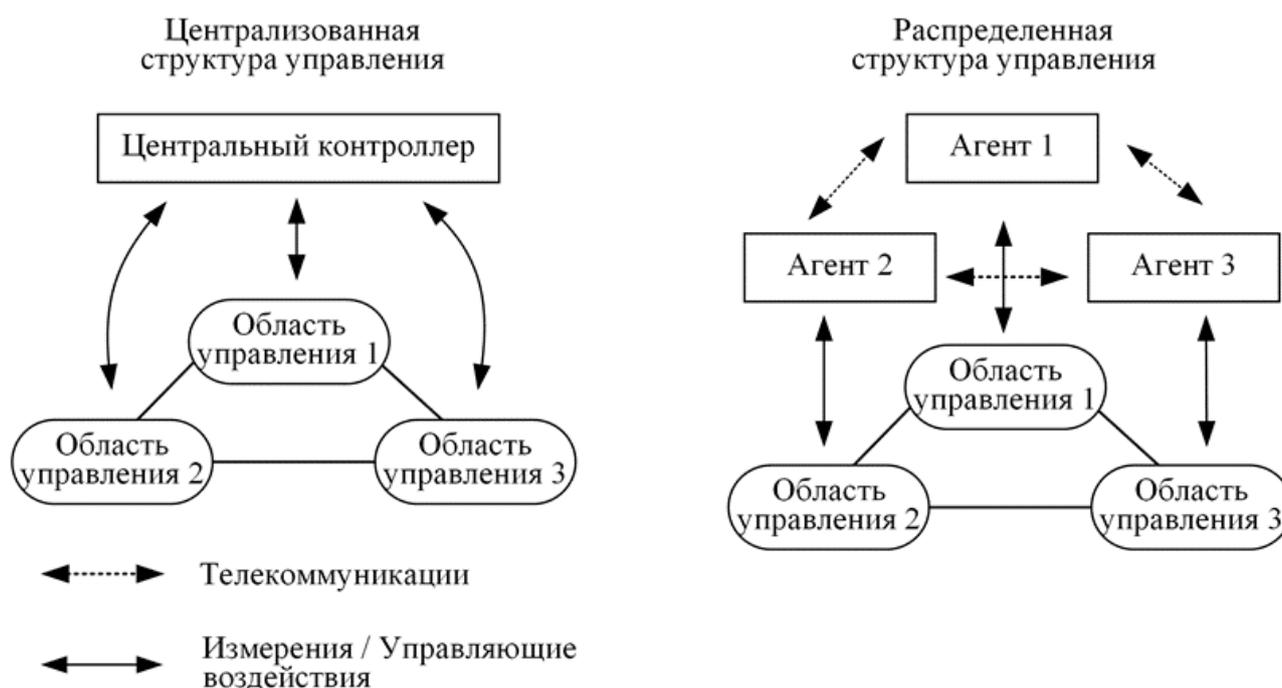


Рис. 2. Подходы к организации управления мультиэнергетической микросети [37]
Fig. 2. Approaches to multi-energy microgrid management organization [37]

нирования энергетической системы, однако имеющаяся сложность ограничивает ее широкое практическое применение. В случае распределенных структур управления общая сложная задача управления делится на ряд более простых подзадач. При этом необходимо выполнить локальное управляющее воздействие, которое зависит от действий окружающих контроллеров и должно реализовываться согласованно. Например, в работе [40] предложена математическая модель для распределенного управления МЭМС. В монографии [41] дана схема для реализации распределенного управления энергохабами, которые моделируют МЭМС. Эта схема учитывает динамику, связанную с работой энергоаккумуляторов. В работе [42] представлен подход к управлению МЭМС, включающих такие энергоносители, как электроэнергия (переменного или постоянного тока), тепловая энергия, водород и природный газ на основе распределенной структуры управления. Этот подход обеспечивает минимизацию общих затрат и/или объема выбросов вредных веществ при соблюдении ограничений в сети и ограничений, связанных с рыночными контрактами.

В ряде научных исследований авторы успешно применяют мультиагентный подход для решения задачи управления функционированием энергетических систем. В статье [43] предлагается архитектура системы управления микросетями, основанная на мультиагентном подходе. Эта архитектура ориентирована на конечного пользователя и обеспечивает мониторинг, управление и контроль энергоресурсов. Предлагаемая архитектура позволяет синтезировать показания датчиков для организации учета и эффективной оптимизации ресурсов. Создаваемая информационно-технологическая архитектура платформы получила название μ GIM, от «microgrid intelligent management». В работе [44] авторы применяют мультиагентную систему управления энергопотреблением для решения задач мониторинга и оптимального управления мультиэнергетическими системами зданий и микросетями с разнотипными ВИЭ и подключенными к ним контролируемыми нагрузками потребителей. В работе [45] для обмена энергией и создания комфортных условий в умном здании представлена иерархическая мультиагентная система управления. Технология иерархической мультиагентной системы при-

меняется для управления инфраструктурным комплексом интеллектуального здания. Для оптимизации режимов функционирования всей системы и интеллектуального поиска решения при управлении интегрированными комплексами зданий и микросетей применяется метод роя частиц. В исследовании, излагаемом в [46], предлагается модель мультиагентной системы, используемая для оптимального управления микросетями, интегрированными с ВИЭ. Производство электроэнергии распределенной генерацией, работающей на разных видах энергоресурсов, имеет нагрузки различной категоричности и предпочтительности их покрытия от собственного источника и/или поставок из централизованной системы. В статье [47] авторы предлагают концепцию оптимального управления температурой в помещении на основе агентного подхода. Предложенная концепция управления учитывает различные требования к параметрам отопления и охлаждения. В работе [48] авторы применяют агентный подход для оптимизации надежности ЭЭС в процессе ее восстановления. В статье [49] авторы применяют мультиагентный подход для рационального распределения нагрузки между централизованными и распределенными источниками энергии в мультиэнергетической энергосистеме. Представленные публикации показывают, что мультиагентный подход является актуальным, востребованным методом и успешно применяется для решения различных проблем, возникающих как в энергетике, так и в других областях науки.

Системы управления энергетическими данными, как правило, состоят из пяти ключевых компонентов:

- устройства измерения;
- система сбора данных;
- коммуникационная система;
- система хранения данных;
- система анализа данных.

Система сбора данных включает оборудование и протоколы, используемые для передачи данных с устройств измерения в систему сбора данных. Через определенные промежутки времени система сбора данных передает данные через коммуникационную систему в систему хранения данных, где полученные данные обрабатываются и хранятся. Затем система «анализ данных» обрабатывает данные для решения следующих задач: извлечение значимой информации из полу-

ченных данных; проведение аналитических расчетов по запросу; отображение результатов в удобных для пользователя форматах.

Коммуникационные ресурсы, реализуемые в МЭМС, также включают в себя набор физических (контроллеры, датчики, сенсоры и пр.) и информационных инструментов (одноранговые сети, облачные ресурсы, интернет энергии и пр.), позволяющие операторам МЭМС и конечным потребителям реализовывать эффективное взаимодействие и управление [12, 50]. В дополнение к сбору данных со всех компонентов генерации, хранения, потребления и связи между операторами МЭМС требуются каналы связи для обмена важной информацией о границах их глобальной координации. Стремительное распространение передовых интеллектуальных счетчиков и коммуникационных технологий открывает широкие возможности для проактивных программ управления спросом конечных потребителей, которые возлагают огромные вычислительные и коммуникационные нагрузки на энергоемкие устройства связи [12, 50, 51]. Учитывая такую ключевую роль коммуникационной инфраструктуры в работе МЭМС, необходимо совместно оптимизировать энергетические и информационные ресурсы МЭМС. Описываемые тенденции показывают увеличение сложности МЭМС и как следствие необходимость более оперативного управления режимами таких систем энергосистем, а в идеале автоматического оптимального управления.

В работе [52] дано описание информационной системы для управления гибридными микросетями, построенной на основе агентных технологий. Представлено решение задачи эффективного управления потоками данных в распределенных гибридных энергосетях. В работе [53] приведено описание потоков данных и требования к ним при решении задач управления зданием или совокупностью зданий в интеллектуальной сети.

Внешние источники обмена информацией для МЭМС и энергетических сообществ включают устройства, подключенные к интернету вещей (IoT) (интеллектуальные устройства, которые обеспечивают доступ к данным/управлению через Интернет), сигналы регулирования частоты и т.д. Чем больше добавляется возможностей по приему и обработке различного рода информации из внешних источников, тем более уязвима

МЭМС к киберугрозам. Это связано с тем, что интеллектуальные счетчики и другие передовые коммуникационные технологии становятся уязвимыми для атак; если уязвимые части, такие как интерфейсы управления, каналы передачи данных и удаленные порты отладки, не защищены должным образом. Устройства IoT, подключенные к общедоступной сети и сети электрических систем одновременно, могут быть и каналами, через которые могут быть выполнены кибератаки [54, 55]. Благодаря быстрому развитию телекоммуникационных систем IoT может взаимодействовать с беспроводными сенсорными сетями (WSN), радиочастотной идентификацией (RFID, микросетями в любой форме, в любое время и в любом месте. Кибербезопасность – это неизбежная проблема, которую необходимо решить при развитии IoT. Если проблема не решается должным образом, злоумышленники воспользуются дефектами и слабостями устройств или объектов, а затем исказят данные или нарушат работу систем через глобальную сеть IoT. Новые методики и технологии должны быть разработаны для удовлетворения требований безопасности, конфиденциальности и надежности IoT [56, 57].

В [58] показано, что из-за уязвимости киберсистем любые киберинциденты могут иметь экономические и технологические последствия для их функционирования. В МЭМС, интенсивно использующих силовую электронику, кибератаки могут иметь гораздо более вредные и разрушительные последствия. Кроме этого, кибератаки могут вызвать значительные экономические проблемы в интеллектуальных микросетях [59, 60], особенно в режиме подключения к сети с ВИЭ. Большинство нерегулируемых рынков электроэнергии состоят из рынка на сутки вперед и рынка в режиме реального времени [61, 62]. Поскольку кибератаки внедрения ложных данных могут повлиять на прогнозирование нагрузки, рынок «на сутки вперед» уязвим для таких атак. Рынок реального времени использует результаты оценивания состояния для оценки генерируемой мощности и мощности нагрузки в каждом узле, которая используется для расчета потока мощности через каждую линию (например, можно применять оптимальный поток мощности). Таким образом, кибератаки, которые влияют на результаты оценивания состоя-

ния, влияют на рынок в реальном времени [63–68].

Большинство существующих методов распределенного управления МЭМС предложены на основе предположения, что вторичные контроллеры блоков распределенной генерации работают в штатных условиях. Однако сбои и атаки распределенной системы управления могут привести к значительным последствиям и, следовательно, повлиять на безопасность и устойчивость МЭМС. В [69] предложена стратегия распределенного устойчивого управления для нескольких систем накопления энергии в изолированных микросетях для решения проблемы кибербезопасности.

В МЭМС сбои и атаки могут происходить в различных местах вторичной системы управления. В частности, устройства управления и связи, имеющие доступ к сети, уязвимы для кибератак [70, 71]. В [72] разработан прототип инструмента под названием Hungee для получения инвариантов-кандидатов, которые необходимо сравнить с фактическими инвариантами для идентификации атаки с внедрением ложных данных. В [73] распределенный вторичный контроль изолированных микросетей достигается с помощью первично-двойственного алгоритма, и предлагаются основанные на модели стратегии обнаружения и локализации аномалий. Работа [74] исследует скрытую стратегию обнаружения кибератак для микросетей постоянного тока. С другой стороны, для повышения устойчивости системы микросетей в недавних исследованиях [75, 76] предлагается киберустойчивая схема управления. Кроме того, было проведено множество исследований для изучения проблем коммуникационных линий и методов смягчения последствий кибератак для микросетей, таких как коммуникационный шум [77], задержки [78] и потеря пакетов [79]. В связи с этим для оценки воздействия кибератаки и выявления наиболее уязвимых объектов ЭЭС в [80] был введен показатель кибербезопасности, под которым понимается уровень защищенности информационной или технологической подсистемы распределенной энергетической сети от кибератак. Кроме того, с целью минимизации последствий кибератак, влияющих на качество информации, используемой при управлении ЭЭС, в [81] проведен анализ киберустойчивости систем сбора, обработки и передачи информации и предложены меры по ее обеспечению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Развитие концепции умных сетей и поиск новых энергоресурсов мотивировано такими проблемами, как нехватка традиционных энергоресурсов, глобальная озабоченность изменением климата и энергетический кризис, связанный с глобальным экономическим развитием и производством.

2. Общие процессы децентрализации, декарбонизации и цифровизации, а также формирование новых энергетических практик, внедрение новых технологий, проникновение ВИЭ и силовой электроники стимулируют все большее развитие микросетей и их трансформацию в МЭМС как автономных и самостоятельных энергетических структур. При этом нестабильность генерации ВИЭ, которая активно используется в МЭМС, отрицательно влияет на их устойчивую работу и усложняет прогнозирование и оптимизацию их режимов.

3. Задача определения оптимального потока распределения в МЭМС сводится к задаче распределения нагрузки между различными энергоисточниками с минимизацией затрат (например, на производство энергии, выбросы загрязняющих веществ, потребление энергии из внешней энергосистемы, потери мощности) и учетом различных ограничений. Решение этой задачи требует учитывать потребность в различных видах энергии, которая удовлетворяется путем использования соответствующих энергоисточников и устройств для преобразования энергии с соблюдением ограничений для каждого вида энергоносителя. Эффективное решение такой задачи возможно при использовании продвинутых математических методов на базе искусственного интеллекта, динамической оптимизации, мультиагентных подходов.

4. Анализ последних исследований указывает на то, что мультиагентные технологии представляются эффективным подходом не только для оперативного управления режимами МЭМС, но и для построения ее надежной информационной сети на уровне систем среднего и низкого напряжений. Мультиагентный принцип также позволяет легко реализовать и внедрить технологию IoT, а также принципы так называемой роевой сети (англ. swarm grid) при реализации физических и информационных уровней систем мониторинга и управления МЭМС.

5. Обзор информационных технологий в области систем распределенной энергетики показывает, что чем больше добавляется воз-

возможностей по приему и обработке различного рода информации из внешних источников, тем более уязвима МЭМС к киберугрозам. Это связано с тем, что интеллектуальные счетчики и другие передовые коммуникационные технологии становятся уязвимыми для атак, если уязвимые части, такие как интер-

фейсы управления, каналы передачи данных и удаленные порты отладки, не защищены должным образом. Устройства IoT, подключенные к общедоступной сети и сети электрических систем одновременно, могут быть и каналами, через которые могут быть выполнены кибератаки.

Список источников

1. Bamberger Y., Baptista J., Belmans R., Buchholz B.M., Chebbo M., Del Valle J.L., et al. Vision and strategy for Europe's electricity networks of the future // European technology platform Smart Grids. 2006. P. 4–35.
2. Бухгольц Б.М., Стычински З.А. Smart grids – основы и технологии энергосистем будущего / пер. с англ. Ю.В. Шарова, П.Ю. Коваленко, К.А. Осинцева; под общ. ред. Н.И. Воропая. М.: МЭИ, 2017. 461 с.
3. Zuo Hongyan, Zhang Bin, Huang Zhonghua, Wei Kexiang, Zhu Hong, Tan Jiqui. Effect analysis on SOC values of the power lithium manganate battery during discharging process and its intelligent estimation // Energy. 2022. Vol. 238. Part B. P. 121854. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121854>.
4. Zhao Xiaohuan, E Jiaqiang, Wu Gang, Deng Yuanwang, Han Dandan, Zhang Bin, et al. A review of studies using graphenes in energy conversion, energy storage and heat transfer development // Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 184. P. 581–599. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.092>.
5. Mirzaei M.A., Sadeghi-Yazdankhah A., Mohammadi-Ivatloo B., Marzband M., Shafie-khah M., Catalão J.P.S. Integration of emerging resources in IGDT-based robust scheduling of combined power and natural gas systems considering flexible ramping products // Energy. 2019. Vol. 189. P. 116195. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116195>.
6. Karimi H., Jadid S. Optimal energy management for multi-microgrid considering demand response programs: a stochastic multi-objective framework // Energy. 2020. Vol. 195. Iss. C. P. 116992. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116992>.
7. Bullich-Massagué E., Díaz-González F., Aragüés-Peñalba M., Girbau-Llistuella F., Olivella-Rosell P., Sumper A. Microgrid clustering architectures // Applied Energy. 2018. Vol. 212. P. 340–361. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.048>.
8. Sadeghi D., Naghshbandy A.H., Bahramara S. Optimal sizing of hybrid renewable energy systems in presence of electric vehicles using multi-objective particle swarm optimization // Energy. 2020. Vol. 209. P. 118471. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118471>.
9. Su Wencong, Wang Jianhui. Energy management systems in microgrid operations // The Electricity Journal. 2012. Vol. 25. Iss. 8. P. 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.010>.
10. Khan M.W., Wang Jie, Xiong Linyun. Optimal energy scheduling strategy for multi-energy generation grid using multi-agent systems // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2021. Vol. 124. P. 106400. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106400>.
11. Xu Da, Zhou Bin, Liu Nian, Wu Qiuwei, Voropai N., Li Canbing, et al. Peer-to-peer multienergy and communication resource trading for interconnected microgrids // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2021. Vol. 17. Iss. 4. P. 2522–2533. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3000906>.
12. Tomin N., Shakirov, V. Kurbatsky V., Muzychuk R., Popova E., Sidorov D., et al. A multi-criteria approach to designing and managing a renewable energy community // Renewable Energy. 2022. Vol. 199. P. 1153–1175. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.151>.
13. Стычински З.А., Воропай Н.И. Возобновляемые источники энергии: теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика. Magdeburg: Магдебургский университет имени Отто-фон-Герике, 2010. 209 с.
14. Fernandez L.P., Roman T.G.S., Cossent R., Domingo C.M., Frías P. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks // IEEE transactions on power systems. 2011. Vol. 26. Iss. 1. P. 206–213. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2049133>.
15. Valsera-Naranjo E., Martinez-Vicente D., Sumper A., Villafila-Robles R. Deterministic and probabilistic assessment of the impact of the electrical vehicles on the power grid // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039546>.
16. Papadopoulos P., Skarvelis-Kazakos S., Unda I.G., Cipcigan L. Electric vehicles' impact on British distribution networks // IET Electrical Systems in Transportation. 2012. Vol. 2. Iss. 3. P. 91–102. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2011.0023>.
17. Vlachogiannis J.G. Probabilistic constrained load flow considering integration of wind power generation and electric vehicles // IEEE Transactions on Power Systems. 2009. Vol. 24. Iss. 4. P. 1808–1817.
18. Duan Min, Darvishan A., Mohammaditab R., Wakil K., Abedinia O. A novel hybrid prediction model for aggregated loads of buildings by considering the electric vehicles // Sustainable Cities and Society. 2018. Vol. 41. C. 205–219. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.009>.
19. Faridimehr S., Venkatachalam S., Chinnam R.B. A stochastic programming approach for electric vehicle charging network design // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2018. Vol. 20. Iss. 5. P. 1870–1882. <https://doi.org/10.1109/ITIS.2018.2722000>.

org/10.1109/TITS.2018.2841391.

20. Morshed M.J., Hmida J.B., Fekih A. A probabilistic multi-objective approach for power flow optimization in hybrid wind-PV-PEV systems // *Applied Energy*. 2018. Vol. 211. P. 1136–1149. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.101>.
21. Zhao L., Prousch S., Hübner M., Moser A. Simulation methods for assessing electric vehicle impact on distribution grids // *IEEE PES T&D 2010*. 2010. <https://doi.org/10.1109/TDC.2010.5484386>.
22. Lopes J.A.P., Soares F.J., Almeida P.M.R. Integration of electric vehicles in the electric power system // *Proceedings of the IEEE*. 2011. Vol. 99. Iss. 1. C. 168–183. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2066250>.
23. Almoghathawi Ya., Barker K. Component importance measures for interdependent infrastructure network resilience // *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 133. P. 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.05.001>.
24. Hu Junjie, Morais Hugo, Sousa Tiago, Lind Morten. Electric vehicle fleet management in smart grids: a review of services, optimization and control aspects // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 56. P. 1207–1226. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.014>.
25. Mwasilu F., Justo J.J., Kim Eun-Kyung, Do Ton Duc. Electric vehicles and smart grid interaction: a review on vehicle to grid and renewable energy sources integration // *Renewable and sustainable energy reviews*. 2014. Vol. 34. P. 501–516. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.031>.
26. Tan Kang Miao, Ramachandaramurthy V.K., Yong Jia Ying. Integration of electric vehicles in smart grid: a review on vehicle to grid technologies and optimization techniques // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 53. P. 720–732. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.012>.
27. Sortomme E., El-Sharkawi M.A. Optimal scheduling of vehicle-to-grid energy and ancillary services // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012. Vol. 3. Iss. 1. P. 351–359.
28. Xu Xiandong, Jia Hongjie, Wang Dan, Yu David C., Chiang Hsiao-Dong. Hierarchical energy management system for multi-source multi-product microgrids // *Renewable Energy*. 2015. Vol. 78. P. 621–630. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.039>.
29. Xu Xiandong, Jin Xiaolong, Jia Hongjie, Yu Xiaodan, Li Kang. Hierarchical management for integrated community energy systems // *Applied Energy*. 2015. Vol. 160. P. 231–243. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.134>.
30. Ramírez-Elizondo L.M., Paap G.C. Scheduling and control framework for distribution level systems containing multiple energy carrier systems: Theoretical approach and illustrative example // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2015. Vol. 66. P. 194–215. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.10.045>.
31. Liu Jinglu, Wang Anna, Wang Xingyu, Tao Ran. Coupled distributed control scheme for multi-energy systems with transmission losses based on event-triggered communication // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2020. Vol. 12. P. 055302. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/5.0024714>.
32. Arnold M., Negenborn R.R., Andersson G., De Schutter B. Distributed predictive control for energy hub coordination in coupled electricity and gas networks // *Intelligent Infrastructures*. Dordrecht: Springer, 2010. Vol. 42. P. 235–273. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3598-1_10.
33. Skarvelis-Kazakos S., Papadopoulos P., Unda I.G., Gorman T., Belaidi A., Zigan S. Multiple energy carrier optimisation with intelligent agents // *Applied Energy*. 2016. Vol. 167. P. 323–335. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.130>.
34. Gomes L., Vale Z., Corchado J.M. Microgrid management system based on a multi-agent approach: an office building pilot // *Measurement*. 2020. Vol. 154. 107427. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107427>.
35. Anvari-Moghaddam A., Rahimi-Kian A., Mirian M.S., Guerrero J.M. A multi-agent based energy management solution for integrated buildings and microgrid system // *Applied Energy*. 2017. Vol. 203. P. 41–56. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.007>.
36. Wang Lingfeng, Wang Zhu, Yang Rui. Intelligent multiagent control system for energy and comfort management in smart and sustainable buildings // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012. Vol. 3. Iss. 2. P. 605–617. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2178044>.
37. Poulin C., Kane M.B. Infrastructure resilience curves: performance measures and summary metrics // *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. Vol. 216. P. 107926. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107926>.
38. Khan M.W., Wang Jie, Xiong Linyun, Ma Meiling. Modelling and optimal management of distributed microgrid using multiagent systems // *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 41. P. 154–169. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.018>.
39. Bünning F., Wetter M., Fuchs M., Müller D. Bidirectional low temperature district energy systems with agent-based control: Performance comparison and operation optimization // *Applied Energy*. 2018. Vol. 209. P. 502–515. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.072>.
40. Ren Yi, Fan Dongming, Feng Qiang, Wang Zili, Sun Bo, Yang Dezhen. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids // *Applied Energy*. 2019. Vol. 249. P. 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.119>.
41. Ahčin P., Šikić M. Simulating demand response and energy storage in energy distribution systems // *International Conference on Power System Technology*. 2010. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2010.5666564>.
42. Sharma P., Mathur H.D., Mishra P., Bansal R.C. A critical and comparative review of energy management strategies for microgrids // *Applied Energy*. 2022. Vol. 327. P. 120028. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120028>.
43. Salehi N., Martínez-García H., Velasco-Quesada G., Guerrero J.M. A comprehensive review of control strategies and

- optimization methods for individual and community microgrids // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 15935–15955. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142810>.
44. Shulyma O., Davidsson P., Shendryk V., Marchenko A. The architecture of an information system for the management of hybrid energy grids // *Position Papers of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems*. 2015. Vol. 6. P. 281–288. <https://doi.org/10.15439/2015F402>.
45. Lawrence T.M., Watson R.T., Boudreau M.-C., Mohammadpour J. Data flow requirements for integrating smart buildings and a smart grid through model predictive control // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 180. P. 1402–1412. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.303>.
46. Zia M.F., Elbouchikhi E., Benbouzid M. Microgrids energy management systems: a critical review on methods, solutions, and prospects // *Applied Energy*. 2018. Vol. 222. P. 1033–1055. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.103>.
47. Fontenot H., Dong Bing. Modeling and control of building-integrated microgrids for optimal energy management – a review // *Applied Energy*. 2019. Vol. 254. P. 113689. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113689>.
48. Qahmash A., Algarni A., Hussain M.R. A comprehensive review on integration challenges, optimization techniques and control strategies of hybrid AC/DC Microgrid // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Iss. 14. P. 6242. <https://doi.org/10.3390/app11146242>.
49. Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G., Sokolov D., Zhou Bin. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach // *Applied Energy*. 2022. Vol. 309. P. 118487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118487>.
50. Bhargavi K.M., Jayalakshmi N.S., Gaonkar D.N., Ashish S. A comprehensive review on control techniques for power management of isolated DC microgrid system operation // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 32196–32228. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060504>.
51. Panaparambil V.S., Kashyap Y., Castelino R.V. A review on hybrid source energy management strategies for electric vehicle // *International Journal of Energy Research*. 2021. Vol. 45. Iss. 14. P. 19819–19850. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/er.7107>.
52. Ma Guolong, Li Jianing, Zhang Xiao-Ping. A review on optimal energy management of multimicrogrid system considering uncertainties // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 77081–77098. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3192638>.
53. Yu Rong, Ding Jiefei, Maharjan S., Gjessing S., Zhang Yan, Tsang Danny H.K. Decentralized and optimal resource cooperation in geo-distributed mobile cloud computing // *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*. 2018. Vol. 6. Iss. 1. P. 72–84. <https://doi.org/10.1109/TETC.2015.2479093>.
54. Ahvar E., Orgerie A.-C., Lèbre A. Estimating energy consumption of cloud, fog and edge computing infrastructures // *IEEE Transactions on Sustainable Computing*. 2019. Vol. 7. Iss. 2. P. 277–288. <https://doi.org/10.1109/TSUSC.2019.2905900>.
55. Mishra S., Anderson K., Miller B., Boyer K., Warren A. Microgrid resilience: a holistic approach for assessing threats, identifying vulnerabilities, and designing corresponding mitigation strategies // *Applied Energy*. 2020. Vol. 264. P. 114726. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114726>.
56. Lu Yang, Xu Li Da. Internet of things (IoT) cybersecurity research: a review of current research topics // *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6. Iss. 2. P. 2103–2115. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2869847>.
57. Atzori L., Iera A., Morabito G. The internet of things: a survey // *Computer Networks*. 2010. Vol. 54. Iss. 15. P. 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.
58. Roman R., Zhou Jianying, Lopez J. On the features and challenges of security and privacy in distributed internet of things // *Computer Networks*. 2013. Vol. 57. Iss. 10. P. 2266–2279. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2012.12.018>.
59. Nejabatkhah F., Li Yun Wei, Liang Hao, Ahrabi R.R. Cyber-security of smart microgrids: a survey // *Energies*. 2020. Vol. 14. Iss. 1. P. 27. <https://doi.org/10.3390/en14010027>.
60. Zhao Chengcheng, He Jianping, Cheng Peng, Chen Jiming. Analysis of consensus-based distributed economic dispatch under stealthy attacks // *Transactions on Industrial Electronics*. 2017. Vol. 64. Iss. 6. P. 5107–5117. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2638400>.
61. Li Peikai, Liu Yun, Xin Huanhai, Jiang Xichen. A robust distributed economic dispatch strategy of virtual power plant under cyber-attacks // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018. Vol. 14. Iss. 10. P. 4343–4352. <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2788868>.
62. Kosut O., Jia Liyan, Thomas R.J., Tong Lang. Malicious data attacks on the smart grid // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2011. Vol. 2. Iss. 4. P. 645–658. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2163807>.
63. Xie Le, Mo Yilin, Sinopoli Bruno. Integrity data attacks in power market operations // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2011. Vol. 2. Iss. 4. P. 659–666. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2161892>.
64. Estay D.A.S., Sahay R., Barfod M.B., Jensen C.D. A systematic review of cyber-resilience assessment frameworks // *Computers & Security*. 2020. Vol. 97. P. 101996. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2020.101996>.
65. Tang Sirui, Liu Zhaoxi, Wang Lingfeng. Power system reliability analysis considering external and insider attacks on the SCADA system // *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*. 2020. <https://doi.org/10.1109/TD39804.2020.9299922>.
66. Chen Bo, Wang Jianhui, Shahidehpour M. Cyber-physical perspective on smart grid design and operation // *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*. 2018. Vol. 3. P. 129–141. <https://doi.org/10.1049/iet-cps.2017.0143>.

67. Xie Le, Mo Yilin, Sinopoli B. False data injection attacks in electricity markets // First IEEE International Conference on Smart Grid Communications. 2010. <https://doi.org/10.1109/SMARTGRID.2010.5622048>.
68. Jia Liyan, Thomas R.J., Tong Lang. Impacts of malicious data on real-time price of electricity market operations // Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences (Maui, HI, 4–7 January 2012). Maui, HI: IEEE, P. 1907–1914. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2012.313>.
69. Deng Chao, Wang Yu, Wen Changyun, Xu Yan, Lin Pengfeng. Distributed resilient control for energy storage systems in cyber–physical microgrids // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2021. Vol. 17. Iss. 2. P. 1331–1341. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2981549>.
70. Sahoo S., Dragičević T., Blaabjerg F. Cyber security in control of grid-tied power electronic converters—challenges and vulnerabilities // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2019. Vol. 9. Iss. 5. P. 5326–5340. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2953480>.
71. Beg O.A., Johnson T.T., Davoudi A. Detection of false-data injection attacks in cyber-physical DC microgrids // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2017. Vol. 13. Iss. 5. P. 2693–2703. <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2656905>.
72. Arghandeh R., Meier A., Mehrmanesh L., Mili L. On the definition of cyber-physical resilience in power systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 58. P. 1060–1069. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.193>.
73. Lu Lin-Yu, Liu Hao Jan, Zhu Hao, Chu Chia-Chi. Intrusion detection in distributed frequency control of isolated microgrids // IEEE Transactions on Smart Grid. 2019. Vol. 10. Iss. 6. P. 6502–6515. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2906573>.
74. Sahoo S., Mishra S., Peng Jimmy Chih-Hsien, Dragicevic T. A stealth cyber-attack detection strategy for DC microgrids // IEEE Transactions on Power Electronics. 2018. Vol. 34. Iss. 8. P. 8162–8174. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2879886>.
75. Abhinav S., Modares H., Lewis F.L., Ferrese F., Davoudi A. Synchrony in networked microgrids under attacks // IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. Vol. 9. Iss. 6. P. 6731–6741. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2721382>.
76. Bidram A., Poudel B., Damodaran L., Fierro R., Guerrero J.M. Resilient and cybersecure distributed control of inverter-based islanded microgrids // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2020. Vol. 16. Iss. 6. P. 3881–3894. <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2941748>.
77. Dehkordi N.M., Baghaee H.R., Sadati N., Guerrero J.M. Distributed noise-resilient secondary voltage and frequency control for islanded microgrids // IEEE Transactions on Smart Grid. 2019. Vol. 10. Iss. 4. P. 3780–3790. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2834951>.
78. Ding Lei, Han Qing-Long, Wang Le Yi, Sindi E. Distributed cooperative optimal control of DC microgrids with communication delays // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2018. Vol. 14. Iss. 9. P. 3924–3935. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2799239>.
79. Duan Jie, Chow Mo-Yuen. Robust consensus-based distributed energy management for microgrids with packet losses tolerance // IEEE Transactions on Smart Grid. 2020. Vol. 11. Iss. 1. P. 281–290. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2921231>.
80. Kolosok I., Gurina L. Calculation of cyber security index in the problem of power system state estimation based on SCADA and WAMS measurements // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). Cham: Springer, 2016. Vol. 8985. P. 172–177. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31664-2_18.
81. Гурина Л.А. Повышение киберустойчивости SCADA и WAMS при кибератаках на информационно-коммуникационную подсистему ЭЭС // Вопросы кибербезопасности. 2022. Т. 2. № 46. С. 18–26. <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2022-2-18-26>.

References

1. Bamberger Y., Baptista J., Belmans R., Buchholz B.M., Chebbo M., Del Valle J.L., et al. Vision and strategy for Europe's electricity networks of the future. In: *European technology platform Smart Grids*. 2006, p. 4-35.
2. Buhholz B.M., Styczynski Z.A. Smart Grids. Fundamentals and technologies in electric power systems of the future, 2017, 461 p. (Russ. ed.: *Smart grids – osnovy i tekhnologii energosistem budushchego*. Moscow: Moscow Power Engineering Institute: 2017, 461 p.)
3. Zuo Hongyan, Zhang Bin, Huang Zhonghua, Wei Kexiang, Zhu Hong, Tan Jiqui. Effect analysis on SOC values of the power lithium manganate battery during discharging process and its intelligent estimation. *Energy*. 2022;238(B):121854. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121854>.
4. Zhao Xiaohuan, E Jiaqiang, Wu Gang, Deng Yuanwang, Han Dandan, Zhang Bin, et al. A review of studies using graphenes in energy conversion, energy storage and heat transfer development. *Energy Conversion and Management*. 2019;184:581-599. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.092>.
5. Mirzaei M.A., Sadeghi-Yazdankhah A., Mohammadi-Ivatloo B., Marzband M., Shafie-khah M., Catalão J.P.S. Integration of emerging resources in IGDT-based robust scheduling of combined power and natural gas systems considering flexible ramping products. *Energy*. 2019;189:116195. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116195>.
6. Karimi H., Jadid S. Optimal energy management for multi-microgrid considering demand response programs: a stochastic multi-objective framework. *Energy*. 2020;195(C):116992. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116992>.
7. Bullich-Massagué E., Díaz-González F., Aragüés-Peñalba M., Girbau-Llistuella F., Olivella-Rosell P., Sumper A. Microg-

- rid clustering architectures. *Applied Energy*. 2018;212:340-361. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.048>.
8. Sadeghi D., Naghshbandy A.H., Bahramara S. Optimal sizing of hybrid renewable energy systems in presence of electric vehicles using multi-objective particle swarm optimization. *Energy*. 2020;209:118471. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118471>.
9. Su Wencong, Wang Jianhui. Energy management systems in microgrid operations. *The Electricity Journal*. 2012;25(8):45-60. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.010>.
10. Khan M.W., Wang Jie, Xiong Linyun. Optimal energy scheduling strategy for multi-energy generation grid using multi-agent systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021;124:106400. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106400>.
11. Xu Da, Zhou Bin, Liu Nian, Wu Qiuwei, Voropai N., Li Canbing, et al. Peer-to-peer multienergy and communication resource trading for interconnected microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021;17(4):2522-2533. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3000906>.
12. Tomin N., Shakirov, V. Kurbatsky V., Muzychuk R., Popova E., Sidorov D, et al. A multi-criteria approach to designing and managing a renewable energy community // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 199. P. 1153–1175. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.151>.
13. Styczynski Z.A., Voropai N.I. *Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics*. Magdeburg: Otto-von- Guericke-Universität Magdeburg; 2010, 209 p. (In Russ.).
14. Fernandez L.P., Roman T.G.S., Cossent R., Domingo C.M., Frías P. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks. *IEEE transactions on power systems*. 2011;26(1):206-213. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2049133>.
15. Valsera-Naranjo E., Martinez-Vicente D., Sumper A., Villafafila-Robles R. Deterministic and probabilistic assessment of the impact of the electrical vehicles on the power grid. In: *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. 2011. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039546>.
16. Papadopoulos P., Skarvelis-Kazakos S., Unda I.G., Cipcigan L. Electric vehicles' impact on British distribution networks. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2012;2(3):91-102. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2011.0023>.
17. Vlachogiannis J.G. Probabilistic constrained load flow considering integration of wind power generation and electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2009;24(4):1808-1817.
18. Duan Min, Darvishan A., Mohammaditab R., Wakil K., Abedinia O. A novel hybrid prediction model for aggregated loads of buildings by considering the electric vehicles. *Sustainable Cities and Society*. 2018;41:205-219. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.009>.
19. Faridimehr S., Venkatachalam S., Chinnam R.B. A stochastic programming approach for electric vehicle charging network design. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2018;20(5):1870-1882. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2841391>.
20. Morshed M.J., Hmida J.B., Fekih A. A probabilistic multi-objective approach for power flow optimization in hybrid wind-PV-PEV systems. *Applied Energy*. 2018;211:1136-1149. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.101>.
21. Zhao L., Prousch S., Hübner M., Moser A. Simulation methods for assessing electric vehicle impact on distribution grids. In: *IEEE PES T&D 2010*. 2010. <https://doi.org/10.1109/TDC.2010.5484386>.
22. Lopes J.A.P., Soares F.J., Almeida P.M.R. Integration of electric vehicles in the electric power system. *Proceedings of the IEEE*. 2011;99(1):168-183. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2066250>.
23. Almoghatthawi Ya., Barker K. Component importance measures for interdependent infrastructure network resilience. *Computers & Industrial Engineering*. 2019;133:153-164. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.05.001>.
24. Hu Junjie, Morais Hugo, Sousa Tiago, Lind Morten. Electric vehicle fleet management in smart grids: a review of services, optimization and control aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;56:1207-1226. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.014>.
25. Mwasilu F., Justo J.J., Kim Eun-Kyung, Do Ton Duc. Electric vehicles and smart grid interaction: a review on vehicle to grid and renewable energy sources integration. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2014;34:501-516. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.031>.
26. Tan Kang Miao, Ramachandaramurthy V.K., Yong Jia Ying. Integration of electric vehicles in smart grid: a review on vehicle to grid technologies and optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;53:720-732. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.012>.
27. Sortomme E., El-Sharkawi M.A. Optimal scheduling of vehicle-to-grid energy and ancillary services. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012;3(1):351-359.
28. Xu Xiandong, Jia Hongjie, Wang Dan, Yu David C., Chiang Hsiao-Dong. Hierarchical energy management system for multi-source multi-product microgrids. *Renewable Energy*. 2015;78:621-630. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.039>.
29. Xu Xiandong, Jin Xiaolong, Jia Hongjie, Yu Xiaodan, Li Kang. Hierarchical management for integrated community energy systems. *Applied Energy*. 2015;160:231-243. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.134>.

30. Ramírez-Elizondo L.M., Paap G.C. Scheduling and control framework for distribution level systems containing multiple energy carrier systems: Theoretical approach and illustrative example. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2015;66:194-215. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.10.045>.
31. Liu Jinglu, Wang Anna, Wang Xingyu, Tao Ran. Coupled distributed control scheme for multi-energy systems with transmission losses based on event-triggered communication. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2020;12:055302. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/5.0024714>.
32. Arnold M., Negenborn R.R., Andersson G., De Schutter B. Distributed predictive control for energy hub coordination in coupled electricity and gas networks. In: *Intelligent Infrastructures*. Dordrecht: Springer; 2010, vol. 42, p. 235-273. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3598-1_10.
33. Skarvelis-Kazakos S., Papadopoulos P., Unda I.G., Gorman T., Belaidi A., Zigan S. Multiple energy carrier optimisation with intelligent agents. *Applied Energy*. 2016;167:323-335. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.130>.
34. Gomes L., Vale Z., Corchado J.M. Microgrid management system based on a multi-agent approach: an office building pilot. *Measurement*. 2020;154:107427. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107427>.
35. Anvari-Moghaddam A., Rahimi-Kian A., Mirian M.S., Guerrero J.M. A multi-agent based energy management solution for integrated buildings and microgrid system. *Applied Energy*. 2017;203:41-56. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.007>.
36. Wang Lingfeng, Wang Zhu, Yang Rui. Intelligent multiagent control system for energy and comfort management in smart and sustainable buildings. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012;3(2):605-617. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2178044>.
37. Poulin C., Kane M.B. Infrastructure resilience curves: performance measures and summary metrics. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021;216:107926. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107926>.
38. Khan M.W., Wang Jie, Xiong Linyun, Ma Meiling. Modelling and optimal management of distributed microgrid using multiagent systems. *Sustainable Cities and Society*. 2018;41:154-169. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.018>.
39. Bünning F., Wetter M., Fuchs M., Müller D. Bidirectional low temperature district energy systems with agent-based control: Performance comparison and operation optimization. *Applied Energy*. 2018;209:502-515. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.072>.
40. Ren Yi, Fan Dongming, Feng Qiang, Wang Zili, Sun Bo, Yang Dezhen. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids. *Applied Energy*. 2019;249:46-57. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.119>.
41. Ahčin P., Šikić M. Simulating demand response and energy storage in energy distribution systems. In: *International Conference on Power System Technology*. 2010. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2010.5666564>.
42. Sharma P., Mathur H.D., Mishra P., Bansal R.C. A critical and comparative review of energy management strategies for microgrids. *Applied Energy*. 2022;327:120028. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120028>.
43. Salehi N., Martínez-García H., Velasco-Quesada G., Guerrer J.M. A comprehensive review of control strategies and optimization methods for individual and community microgrids. *IEEE Access*. 2022;10:15935-15955. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142810>.
44. Shulyma O., Davidsson P., Shendryk V., Marchenko A. The architecture of an information system for the management of hybrid energy grids. In: *Position Papers of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems*. 2015;6:281-288. <https://doi.org/10.15439/2015F402>.
45. Lawrence T.M., Watson R.T., Boudreau M.-C., Mohammadpour J. Data flow requirements for integrating smart buildings and a smart grid through model predictive control. *Procedia Engineering*. 2017;180:1402-1412. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.303>.
46. Zia M.F., Elbouchikhi E., Benbouzid M. Microgrids energy management systems: a critical review on methods, solutions, and prospects. *Applied Energy*. 2018;222:1033-1055. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.103>.
47. Fontenot H., Dong Bing. Modeling and control of building-integrated microgrids for optimal energy management – a review. *Applied Energy*. 2019;254:113689. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113689>.
48. Qahmash A., Algarni A., Hussain M.R. A comprehensive review on integration challenges, optimization techniques and control strategies of hybrid AC/DC Microgrid. *Applied Sciences*. 2021;11(14):6242. <https://doi.org/10.3390/app11146242>.
49. Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G., Sokolov D., Zhou Bin. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach. *Applied Energy*. 2022;309:118487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118487>.
50. Bhargavi K.M., Jayalakshmi N.S., Gaonkar D.N., Ashish S. A comprehensive review on control techniques for power management of isolated DC microgrid system operation. *IEEE Access*. 2021;9:32196-32228. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060504>.
51. Panaparambil V.S., Kashyap Y., Castelino R.V. A review on hybrid source energy management strategies for electric vehicle. *International Journal of Energy Research*. 2021;45(14):19819-19850. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/er.7107.52>. Ma Guolong, Li Jianing, Zhang Xiao-Ping. A review on optimal energy management of multimicrogrid system considering uncertainties. *IEEE Access*. 2022;10:77081-77098. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3192638>.
53. Yu Rong, Ding Jiefei, Maharjan S., Gjessing S., Zhang Yan, Tsang Danny H.K. Decentralized and optimal resource coop-

- eration in geo-distributed mobile cloud computing. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*. 2018;6(1):72-84. <https://doi.org/10.1109/TETC.2015.2479093>.
54. Ahvar E., Orgerie A.-C., L ebre A. Estimating energy consumption of cloud, fog and edge computing infrastructures. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*. 2019;7(2):277-288. <https://doi.org/10.1109/TSUSC.2019.2905900>.
55. Mishra S., Anderson K., Miller B., Boyer K., Warren A. Microgrid resilience: a holistic approach for assessing threats, identifying vulnerabilities, and designing corresponding mitigation strategies. *Applied Energy*. 2020;264:114726. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114726>.
56. Lu Yang, Xu Li Da. Internet of things (IoT) cybersecurity research: a review of current research topics. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019;6(2):2103-2115. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2869847>.
57. Atzori L., Iera A., Morabito G. The internet of things: a survey. *Computer Networks*. 2010;54(15):2787-2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.
58. Roman R., Zhou Jianying, Lopez J. On the features and challenges of security and privacy in distributed internet of things. *Computer Networks*. 2013;57(10):2266-2279. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2012.12.018>.
59. Nejabatkhah F., Li Yun Wei, Liang Hao, Ahrabi R.R. Cyber-security of smart microgrids: a survey. *Energies*. 2020;14(1):27. <https://doi.org/10.3390/en14010027>.
60. Zhao Chengcheng, He Jianping, Cheng Peng, Chen Jiming. Analysis of consensus-based distributed economic dispatch under stealthy attacks. *Transactions on Industrial Electronics*. 2017;64(6):5107-5117. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2638400>.
61. Li Peikai, Liu Yun, Xin Huanhai, Jiang Xichen. A robust distributed economic dispatch strategy of virtual power plant under cyber-attacks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018;14(10):4343-4352. <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2788868>.
62. Kosut O., Jia Liyan, Thomas R.J., Tong Lang. Malicious data attacks on the smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2011;2(4):645-658. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2163807>.
63. Xie Le, Mo Yilin, Sinopoli Bruno. Integrity data attacks in power market operations. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2011;2(4):659-666. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2161892>.
64. Estay D.A.S., Sahay R., Barfod M.B., Jensen C.D. A systematic review of cyber-resilience assessment frameworks. *Computers & Security*. 2020;97:101996. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2020.101996>.
65. Tang Sirui, Liu Zhaoxi, Wang Lingfeng. Power system reliability analysis considering external and insider attacks on the SCADA system. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*. 2020. <https://doi.org/10.1109/TD39804.2020.9299922>.
66. Chen Bo, Wang Jianhui, Shahidehpour M. Cyber-physical perspective on smart grid design and operation. *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*. 2018;3:129-141. <https://doi.org/10.1049/iet-cps.2017.0143>.
67. Xie Le, Mo Yilin, Sinopoli B. False data injection attacks in electricity markets. *First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*. 2010. <https://doi.org/10.1109/SMARTGRID.2010.5622048>.
68. Jia Liyan, Thomas R.J., Tong Lang. Impacts of malicious data on real-time price of electricity market operations. In: *Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences*. 4–7 January 2012, Maui, HI. Maui, HI: IEEE; p. 1907-1914. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2012.313>.
69. Deng Chao, Wang Yu, Wen Changyun, Xu Yan, Lin Pengfeng. Distributed resilient control for energy storage systems in cyber-physical microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021;17(2):1331-1341. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2981549>.
70. Sahoo S., Dragi evi  T., Blaabjerg F. Cyber security in control of grid-tied power electronic converters—challenges and vulnerabilities. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2019;9(5):5326-5340. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2953480>.
71. Beg O.A., Johnson T.T., Davoudi A. Detection of false-data injection attacks in cyber-physical DC microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2017;13(5):2693-2703. <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2656905>.
72. Arghandeh R., Meier A., Mehrmanesh L., Mili L. On the definition of cyber-physical resilience in power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;58:1060-1069. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.193>.
73. Lu Lin-Yu, Liu Hao Jan, Zhu Hao, Chu Chia-Chi. Intrusion detection in distributed frequency control of isolated microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019;10(6):6502-6515. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2906573>.
74. Sahoo S., Mishra S., Peng Jimmy Chih-Hsien, Dragicevic T. A stealth cyber-attack detection strategy for DC microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018;34(8):8162-8174. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2879886>.
75. Abhinav S., Modares H., Lewis F.L., Ferrese F., Davoudi A. Synchrony in networked microgrids under attacks. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017;9(6):6731-6741. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2721382>.
76. Bidram A., Poudel B., Damodaran L., Fierro R., Guerrero J.M. Resilient and cybersecure distributed control of inverter-based islanded microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020;16(6):3881-3894. <https://doi.org/10.1109/>

TII.2019.2941748.

77. Dehkordi N.M., Baghaee H.R., Sadati N., Guerrero J.M. Distributed noise-resilient secondary voltage and frequency control for islanded microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019;10(4):3780-3790. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2834951>.

78. Ding Lei, Han Qing-Long, Wang Le Yi, Sindi E. Distributed cooperative optimal control of DC microgrids with communication delays. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018;14(9):3924-3935. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2799239>.

79. Duan Jie, Chow Mo-Yuen. Robust consensus-based distributed energy management for microgrids with packet losses tolerance. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020;11(1):281-290. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2921231>.

80. Kolosok I., Gurina L. Calculation of cyber security index in the problem of power system state estimation based on SCADA and WAMS measurements. In: *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Cham: Springer; 2016, vol. 8985, p. 172-177. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31664-2_18.

81. Gurina L. Increasing cyber resilience of SCADA and WAMS in the event of cyber attacks on the information and communication subsystem of the electric power system. *Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity issues*. 2022;2(46):18-26. <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2022-2-18-26>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Томин Никита Викторович,

к.т.н.,
заведующий лабораторией,
Отдел электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
tomin.nv@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5898-9649>

Домышев Александр Владимирович,

к.т.н.,
научный сотрудник,
Отдел электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
domyshev@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2770-2531>

Барахтенко Евгений Алексеевич,

к.т.н., доцент,
старший научный сотрудник,
Отдел трубопроводных систем энергетики,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
barakhtenko@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6934-0025>

Шакиров Владислав Альбертович,

к.т.н., доцент,
заведующий лабораторией,
Отдел комплексных и региональных проблем
энергетики,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
mynovember@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8629-9549>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikita V. Tomin,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of Laboratory,
Department of Electric Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
tomin.nv@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5898-9649>

Alexander V. Domyshev,

Cand. Sci. (Eng.),
Researcher,
Department of Electric Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
domyshev@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2770-2531>

Evgeniy A. Barakhtenko,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Senior Researcher,
Energy Pipeline Systems Department,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
barakhtenko@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6934-0025>

Vladislav A. Shakirov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of Laboratory,
Department of Complex and Regional Energy Problems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
mynovember@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8629-9549>

Козлов Александр Николаевич,

к.т.н.,
старший научный сотрудник,
Отдел теплосиловых систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
kozlov@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5983-5884>

Alexander N. Kozlov,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Thermal Power Systems Department,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
kozlov@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5983-5884>

Сосновский Илья Константинович,

аспирант,
инженер,
Отдел теплосиловых систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
sosnovskiy71@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-3153-9898>

Ilya K. Sosnovsky,

Postgraduate Student,
Engineer,
Thermal Power Systems Department,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
sosnovskiy71@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-3153-9898>

Лю Фанг,

профессор,
Центральный Южный университет,
410017, Чанша, провинция Хунань, Китай
csuliufang@csu.edu.cn
<https://orcid.org/0000-0003-0750-8344>

Fang Liu,

Professor,
Central South University,
Changsha Hunan 410017 China,
csuliufang@csu.edu.cn
<https://orcid.org/0000-0003-0750-8344>

Сидоров Денис Николаевич,

д-р ф.-м. наук, профессор РАН,
главный научный сотрудник,
Отдел прикладной математики,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
contact.dns@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3131-1325>

Denis N. Sidorov,

Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Professor of the Russian Academy of Sciences,
Chief Researcher,
Applied Mathematics Department,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
contact.dns@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3131-1325>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Сидоров Д.Н. является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2019 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Conflict of interests

Denis N. Sidorov has been a member of the editorial board of the iPolytech Journal since 2019, but she did not take part in making decision about publishing the article under consideration. The article was reviewed following the Journal's review procedure. The authors did not report any other conflicts of interest.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 27.09.2023 г.;
одобрена после рецензирования 17.10.2023 г.;
принята к публикации 12.11.2023 г.

Information about the article

The article was submitted 27.09.2023;
approved after reviewing 17.10.2023;
accepted for publication 12.11.2023.

Научная статья
УДК 669.712
EDN: WYVZQG
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-790-799

МЕТАЛЛУРГИЯ



Низкотемпературное спекание бокситового сырья со щелочью – альтернативная технология переработки бокситов по параллельному варианту способа Байер-спекания

И.В. Логинова¹, А.В. Кырчиков^{2✉}, Л.И. Чайкин³, Ю.А. Напольских⁴

¹⁻⁴Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Резюме. Цель – разработка альтернативной технологии переработки бокситового сырья на основе низкотемпературного спекания боксита с каустической щелочью, а также решение вопроса борьбы с углеродным следом на глиноземных заводах Урала. Лабораторные испытания проводились спеканием искусственно полученного бемита и гематита с химически чистой каустической щелочью при температурах 300, 500 и 700°C и дальнейшем их выщелачивании в слабощелочных растворах. Для изучения фазового, химического и гранулометрического составов красных шламов после выщелачивания в исследованиях были использованы различные физико-химические методы анализа: рентгенофлуоресцентный, метод титрования, рентгенофазовый, сканирующая электронная микроскопия, магнитометрия с вибрирующим образцом; для определения удельной площади поверхности и пористости использовали метод Брунауэра-Эммета-Теллера. В результате изучения кинетики прохождения твердофазной реакции взаимодействия бемита с каустической щелочью установлено, что в изучаемом температурном диапазоне взаимодействие идет в кинетическом режиме. Показано также, что при спекании гематита при температурах 300 и 500°C и дальнейшем выщелачивании спека водой происходит минералогическое изменение шлама с получением нового минерала – маггемита, обладающего магнитными свойствами. При изучении магнитных свойств красного шлама низкотемпературного спекания боксита установлено, что намагниченность достигает значения насыщения 19–20 электромагнитных единиц на г (при плотности образца 2,38 г/см³) при магнитном поле 10 кЭ. Удельная площадь поверхности этих образцов составила 54,97 и 51,77 м²/г. Выполненные исследования подтверждают возможность адаптации предложенной технологии для бокситов с получением высокожелезистых красных шламов. Это способствует комплексной переработке бокситового сырья и изучению возможности снижения углеродных выбросов на глиноземных заводах за счет исключения операции спекания с содой и известняком, которая сопровождается выделением CO₂ при разложении этих соединений.

Ключевые слова: алюминат натрия, каустическая щелочь, маггемит, спекание, красный шлам, углеродный след

Финансирование: Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 22-29-01515.

Для цитирования: Логинова И.В., Кырчиков А.В., Чайкин Л.И., Напольских Ю.А. Низкотемпературное спекание бокситового сырья со щелочью – альтернативная технология переработки бокситов по параллельному варианту способа Байер-спекания // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 790–799. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-790-799>. EDN: WYVZQG.

METALLURGY

Original article

Low-temperature sintering of bauxite raw material with alkali as an alternative to the parallel Bayer sintering process

Irina V. Loginova¹, Aleksey V. Kyrchikov^{2✉}, Leonid I. Chaikin³, Yulia A. Napolskikh⁴

¹⁻⁴Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The aim is to develop an alternative technology of bauxite raw material processing based on low-temperature sintering of bauxite with caustic alkali, as well as to solve the issue of carbon footprint control at alumina refineries in the Urals. Laboratory tests were carried out by sintering artificial bemite and hematite with chemically pure caustic alkali at

© Логинова И.В., Кырчиков А.В., Чайкин Л.И., Напольских Ю.А., 2023

temperatures of 300, 500 and 700°C and their further leaching in weakly alkaline solutions. To study the phase, chemical, and particle size distribution of red muds after leaching, various physical and chemical methods of analysis were used, such as X-ray fluorescence, titration method, X-ray phase analysis, scanning electron microscopy, magnetometry with a vibrating sample. The Brunauer – Emmett – Teller method was used to determine the specific surface area and porosity. The study of the kinetics of the solid-phase reaction of the bemitite interaction with caustic alkali has shown the kinetic interaction in the temperature range under study. Moreover, sintering of hematite at temperatures of 300 and 500°C and further leaching of the sinter with water resulted in mineralogical changes in the sludge with the production of a new mineral, maghemite, which possesses magnetic properties. When studying the magnetic properties of red mud of low-temperature sintering of bauxite, we determined that the magnetization was as high as 19–20 electromagnetic units per g (at a sample density of 2.38 g/cm³) at a magnetic field of 10 kE. The specific surface area of these samples was 54.97 and 51.77 m²/g. The performed studies confirm that the proposed technology can be adapted for bauxite to produce high-iron red slimes, thus contributing to the integrated processing of bauxite raw materials. In addition, ways to reduce carbon emissions at alumina refineries by eliminating the sintering operation with soda and limestone, which is accompanied by CO₂ emission during decomposition of these compounds, can be studied.

Keywords: sodium aluminate, caustic alkali, maghemite, sintering, red mud, carbon footprint

Funding: The work was funded by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-01515.

For citation: Loginova I.V., Kyrchikov A.V., Chaikin L.I., Napolskikh Yu.A. Low-temperature sintering of bauxite raw material with alkali as an alternative to the parallel Bayer sintering process. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):790-799. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-790-799>. EDN: WYVZQG.

ВВЕДЕНИЕ

Для улучшения основных показателей работы глиноземных заводов требуется непрерывная модернизация технологических переделов производства, изучение возможности снижения потребления энергоресурсов, топлива, достижение максимального извлечения полезных компонентов из перерабатываемого сырья, а также исследование возможности переработки полученных красных шламов, которые относятся к категории техногенных отходов.

Кроме того, актуальными остаются задача разработки альтернативных, экономически выгодных способов переработки низкокачественных бокситовых руд и решение проблемы утилизации красных шламов с перспективой в дальнейшем использовать их для производства железосодержащих концентратов и концентратов редкоземельных металлов (РЗМ). Эти проблемы описаны в электронном ресурсе ООО «БизнесСтат»⁵ и в источниках [1, 2].

В настоящий момент на глиноземных заводах Урала для переработки бокситового сырья используется технологическая схема параллельного варианта Байер-спекания, которая позволяет перерабатывать как высококачественное бокситовое сырье в способе Байера, так и низкокачественное в способе спекания⁶ [3]. Данная технология была опробована и внедрена еще в 60-х годах прошлого столетия.

В этом способе энергоемкими являются как процесс выщелачивания бокситов в автоклавах при высоких температурах и мощных давлениях в ветви гидрохимии, так и процесс спекания при переработке низкокачественных бокситов. Спекание характеризуется большим расходом топлива [4, 5] и высоким выходом красного шлама. Для снижения себестоимости производства глинозема при использовании в качестве сырья низкокачественных бокситов Среднего Тимана необходимо стремиться к уменьшению затрат при его переработке как по способу Байера в гидрохимической ветви, так и в технологическом цикле ветви спекания. Это можно осуществить при реализации предлагаемого технологического решения низкотемпературного спекания бокситового сырья с каустической щелочью при температуре 300–400°C, что позволяет достигнуть максимального извлечения полезных компонентов из исходного сырья, а также сокращением выхода красного шлама практически в два раза, по сравнению с существующим в настоящий момент [6, 7], и в перспективе с возможностью комплексной переработки боксового сырья с получаемых стандартных промышленных растворов.

При использовании предлагаемой технологии снижается углеродный след от производства глинозема [8]. В работах [9–11] показано сколько CO₂ выделяется при произ-

⁵Анализ мирового рынка глинозема в 2018–2022 гг, прогноз на 2023–2027 гг // ООО «БизнесСтат» [Электронный ресурс]. URL: https://businessstat.ru/images/demo/alumina_world_demo_businessstat.pdf (08.11.2023).

⁶Лайнер А.И., Еремин Н.И., Лайнер Ю.А., Певзнер И.З. Производство глинозема: учеб. пособ. М.: Металлургия, 1978. 344 с.

водстве Al. В настоящий момент основным источником CO₂ на Российских глиноземных заводах является высокотемпературный передел спекания, где основными компонентами шихты являются углекислая (кальцинированная) сода (Na₂CO₃), известняк (CaCO₃) и боксит. Все превращения, проходящие во вращающихся трубчатых печах, сопровождаются выделением углекислого газа (CO₂). При производстве каждой тонны глинозема выделяется до 220 кг CO₂, соответственно Уральские глиноземные комбинаты выделяют более 400 тыс. т CO₂⁷. По приближенным расчетам в ЕС одна тонна выбросов углекислого газа в окружающую среду оплачивается предприятием в размере 50 долл за 1 т [12, 13]. Именно такой размер оплаты позволяет оправдать переход на экологически чистые методы производства металлов. Кроме того, в настоящий момент Президентом РФ подписана Климатическая доктрина России⁸, целью которой является достижение баланса между выбросами промышленных предприятий и их поглощением к 2060 г. Также Россия намерена полностью выполнить международные обязательства по сокращению выбросов парниковых газов.

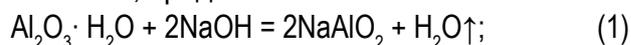
ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является изучение твердофазных реакций предлагаемой технологии низкотемпературного спекания бокситового сырья с каустической щелочью, исследование кинетики растворения алюмината натрия, фазового состава и физических свойств, получаемых после выщелачивания спеков красных шламов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В лабораторных условиях с целью определения оптимальных условий протекания твердофазных реакций спекания основных компонентов бокситового сырья по предлагаемой технологии были проведены исследования на искусственно полученном минерале бемита с целью получения алюмината натрия, а также проведены опыты низкотемпературного спекания на химически чистом реактиве оксида железа с целью получения феррита натрия. После выщелачивания данных продуктов устанавливался процент

извлечения полезных компонентов в раствор и выход красного шлама в зависимости от температуры спекания, которая варьировалась от 300°C до 700°C. Также были получены кинетические кривые извлечения алюминия из алюмината натрия. Твердая фаза гематитового шлама в дальнейшем подвергалась различным физико-химическим методам анализа с целью изучения ее фазового состава. Для этого был применен рентгенофазовый анализ (РФА), электронная микроскопия, определена удельная площадь поверхности образцов с применением метода математического описания физической адсорбции Брунауэра, Эммета и Теллера (БЭТ). Далее, с целью подтверждения и проверки полученных исследований, проведенных на искусственно полученных минералах, были продолжены опыты по спеканию бокситов Среднего Тимана в тех же условиях. Эксперименты по выщелачиванию бокситового спека в дистиллированной воде проводились в лабораторном реакторе, оборудованном верхнеприводной мешалкой и датчиком контроля температуры процесса. Шлам также анализировали с привлечением различных физико-химических методов анализа. Химические реакции, протекающие при спекании, представлены ниже:



Для эксперимента по изучению кинетики извлечения алюминия при спекании бемита с каустической щелочью был использован бемит, полученный гидротермальным способом в лаборатории путем выдержки продукционного гидроксида алюминия Уральского алюминиевого завода в автоклаве, в дистиллированной воде, при температуре 260°C и Ж:Т = 4:1 в течение 1 ч.

Полученный бемит подвергался операции спекания с каустической щелочью при различных температурах и продолжительности (рис. 1). Массовое отношение NaOH к бемиту составляло 1,1:1, затем спек выщелачивался водой при 90°C в течение 0,5 ч при Ж:Т как 5:1 для всех полученных спеков.

Варьируемыми параметрами являлись температура (200–400°C с шагом 100°C), про-

⁷Савченко А.И. Автоматизированный расчет материального баланса производства глинозема по комбинированной схеме Байер-спекание. Краснотурьинск: УГТУ-УПИ, 2001. 123 с.

⁸Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 26 окт. 2023 № 812 (ред. от 17.12.2009). Собрание законодательства РФ 30.10.2023 № 44 (часть III), ст. 7865.

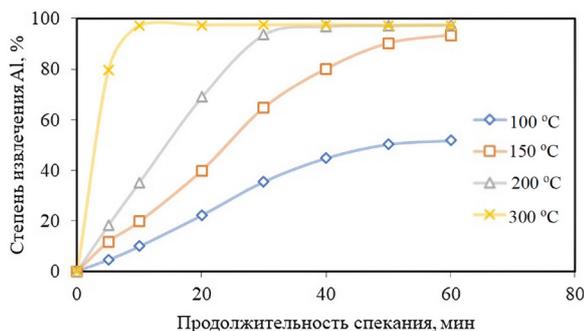


Рис. 1. Кинетические кривые извлечения алюминия из спека при спекании бемита с каустической щелочью
Fig. 1. Kinetic curves of aluminum extraction from cake when sintering boehmite and caustic alkali

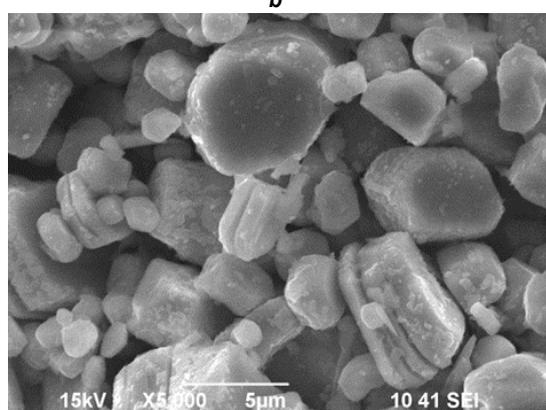
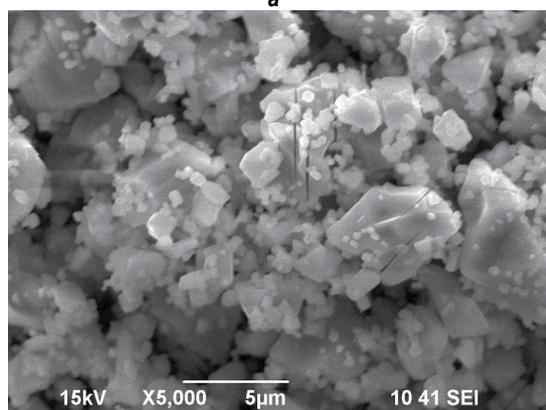
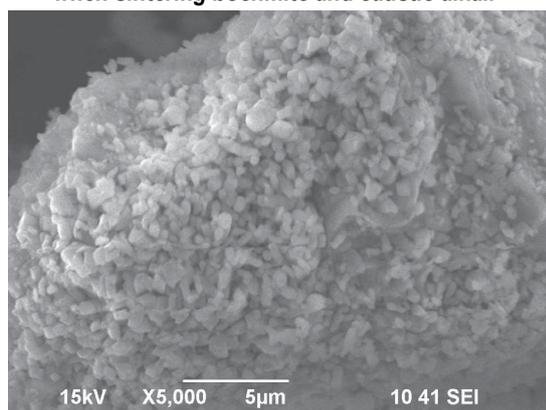


Рис. 2. Электронная микрофотография красного шлама после выщелачивания спеков, полученных при спекании гематита со щелочью при температурах: а – 300, б – 500, с – 700 °С

Fig. 2. Electron micrograph of red mud resulting from leaching the cakes obtained by hematite and alkali sintering at the temperatures of: a – 300, b – 500, c – 700 °C

должительность (30–90 мин с шагом 30 мин) и массовое отношение NaOH к бокситу (0,8–1,2 с шагом 0,2). Лучше всего для описания процесса подошла нейронсетевая модель на основе многослойного персептрона 3-10-1, где 3 – количество входов, 10 – количество скрытых слоев, 1 – количество выходов. Данная модель не имеет аналитического выражения, но она позволяет описывать экспериментальные данные с высокой точностью ($R^2 = 0,985$).

По кинетическим кривым на рис. 2 видно, что спекание с NaOH уже при 200 °C в течение 30 мин позволяет извлекать из боксита практически весь глинозем. Данная температура сопоставима с выщелачиванием в цикле Байера, но не требует автоклавного оборудования.

Далее нами были проведены исследования свойств твердых остатков и фазовых превращений гематита при спекании его со щелочью с последующим выщелачиванием спека водой. Эксперименты осуществлялись при температурах 300, 500, 700 °C с охлаждением спека вместе с печью. В дальнейшем спек выщелачивали в воде, твердая фаза отделялась на вакуумной установке с шестикратной промывкой горячей дистиллированной водой и сушкой полученной твердой фракции при температуре 110 °C в течение 2 ч. Затем высушенная фракция вновь подвергалась выщелачиванию водой в течение 1 ч при температуре 90 °C с целью отмывки оставшейся щелочи. Полученный продукт подвергался различным методам физико-химического анализа: электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, БЭТ. Результаты электронной микроскопии продуктов представлены на рис. 3.

По результатам энергодисперсионного анализа среднее значение содержания элементов в частице образца при температуре спекания 300 °C составило, % масс.: O – 12,3; Na – 0,83; Fe – 79,7.

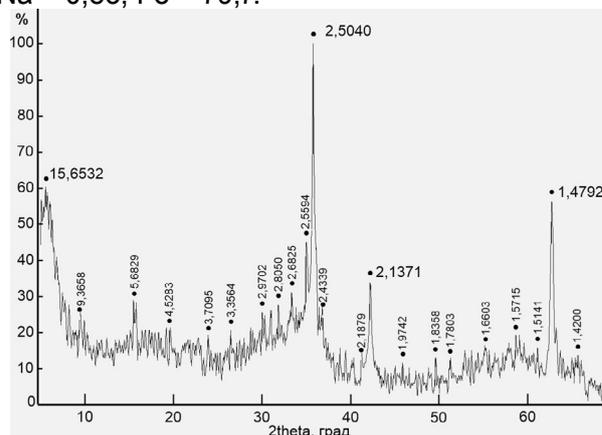


Рис. 3. Рентгенофазовый анализ образца 300 °C
Fig. 3. X-ray diffraction analysis of the sample at 300 °C

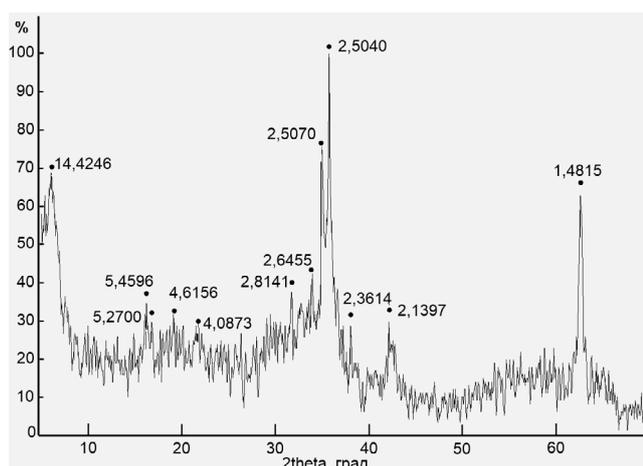


Рис. 4. Рентгенофазовый анализ образца 500°C
Fig. 4. X-ray diffraction analysis of the sample at 500°C

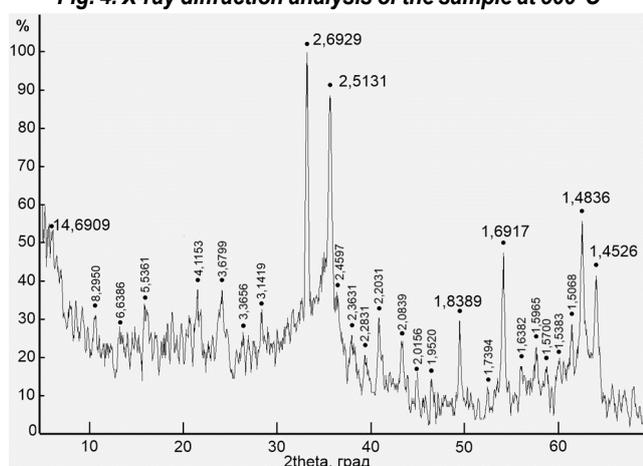


Рис. 5. Рентгенофазовый анализ образца 700°C
Fig. 5. X-ray diffraction analysis of the sample at 700°C

Среднее значение содержания элементов в частице образца при температуре спекания 500°C составило, % масс.: O = 10,9; Na = 0,82; Fe = 88,3.

Среднее значение содержания элементов в частице образца при температуре спекания 700°C составило, % масс.: O = 12,5; Na = 1,52; Fe = 85,6.

Затем с целью определения фазового состава полученных шламов был проведен рентгенофазовый анализ, результаты которого представлены на рис. 3-5.

Изучая представленные выше рентгено-

граммы образцов при 300, 500, 700°C, можно достоверно утверждать наличие трех основных фаз в них – Fe₂O₃, γ-Fe₂O₃, Fe(OH)₃. Образцы при 300°C и 500°C представлены в основном маггемитом, а 700°C – гидроксидными фазами железа.

Одним из физических методов анализа являлся метод БЭТ, используемый для определения удельной площади поверхности изучаемых образцов. Результаты анализа приведены в табл. 1. Видно, что наибольшей площадью поверхности обладал шлам, полученный при 300°C. Кроме всего прочего, было обнаружено, что наличие в пробах γ-Fe₂O₃ придает им магнитные свойства.

В дальнейшем в лаборатории было проведено исследование выявленных закономерностей на реальном объекте – боксите Средне-Тиманского месторождения. Изучалось варьирование различных параметров процесса на степень извлечения алюминия из бокситов Среднего Тимана и выход красного шлама. Химический анализ использованного для эксперимента боксита представлен в табл. 2.

Изучая представленные выше рентгенограммы образцов при 300, 500, 700°C, можно достоверно утверждать наличие трех основных фаз в них – Fe₂O₃, γ-Fe₂O₃, Fe(OH)₃. Образцы при 300°C и 500°C представлены в основном маггемитом, а 700°C – гидроксидными фазами железа.

Одним из физических методов анализа являлся метод БЭТ, используемый для определения удельной площади поверхности изучаемых образцов. Результаты анализа приведены в табл. 1. Видно, что наибольшей площадью поверхности обладал шлам, полученный при 300°C. Кроме всего прочего, было обнаружено, что наличие в пробах γ-Fe₂O₃ придает им магнитные свойства.

В дальнейшем в лаборатории было проведено исследование выявленных закономерностей на реальном объекте – боксите Средне-Тиманского месторождения. Изучалось

Таблица 1. Удельная площадь поверхности образцов шлама, полученных при 300, 500 и 700°C
Table 1. Specific surface area of sludge samples obtained at the temperature of 300, 500 and 700°C

Параметры	Образец		
	300	500	700
Площадь поверхности (м ² /г)	62,651	6,396	1,982
Микропористость (м ² /г)	0,106	0,342	0,102
Масса исследуемого образца (г)	1,044	0,998	0,953

варьирование различных параметров процесса на степень извлечения алюминия из бокситов Среднего Тимана и выход красного шлама. Химический анализ использованного для эксперимента боксита представлен в табл. 2.

Ранее проведенный анализ фазового состава показал, что основными минералами боксита Средне-Тиманского месторождения являются следующие: бемит, гематит, диаспор, кварц, рутил, шамозит [14]. На рис. 6 представлены результаты экспериментов, показывающие влияние температуры спекания боксита с каустической щелочью на извлечение глинозема и выход красного шлама, полученного после выщелачивания данного спека.

Установлено, что наибольшее извлечение глинозема наблюдается при температуре спекания 300°C, бемит переходит в алюминат натрия практически полностью, на что указывает кинетика взаимодействия чистого бемита с каустической щелочью, описанная ранее. Также показано снижение выхода красного шлама при данных параметрах процесса. В результате наилучшей температурой среди изученных была 300°C. Для снижения количества экспериментов был построен план экспериментов в прикладном пакете программ

Таблица 2. Химический состав боксита Среднего Тимана
Table 2. Chemical composition of the Middle Timan bauxite

Содержание компонентов, % масс.							
Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	CO ₂	TiO ₂	H ₂ O	μ _{Si}
50,27	24,60	8,31	0,42	0,30	2,90	15,50	6,06

Отношение NaOH к бокситу = 1,0

Температура = 300 °С

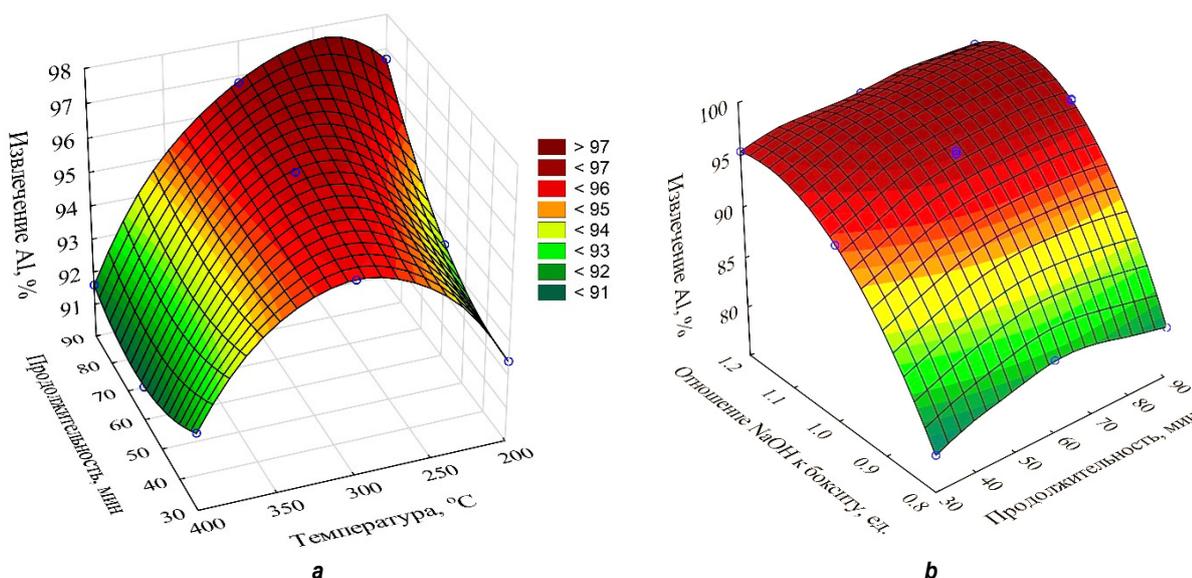


Рис. 7. Зависимость извлечения алюминия от продолжительности и температуры спекания (а), продолжительности и отношения NaOH к бокситу (б)

Fig. 7. Aluminum recovery vs sintering duration and temperature (a), duration and NaOH to bauxite ratio (b)

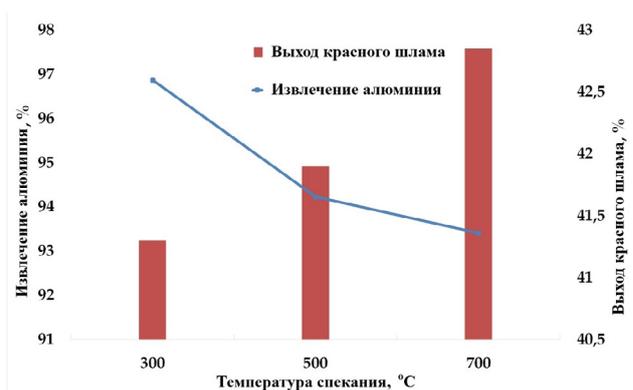


Рис. 6. Влияние температуры спекания боксита со щелочью на извлечение глинозема и выход красного шлама

Fig. 6. Bauxite and alkali sintering temperature vs alumina recovery and red mud yield

Statistica 13. Варьируемыми параметрами являлись температура, продолжительность и массовое отношение NaOH к бокситу. На рис. 7 показаны поверхности отклика, построенные на основе полученных результатов по извлечению Al.

Очевидно, что температура оказывает двоякую роль на извлечение алюминия из раствора (см. рис. 7 а). До 300°C идет увеличение степени извлечения алюминия, затем наблюдается некоторое снижение, что, очевидно,

связано с полным вскрытием всех минералов, включая кремнийсодержащие. В табл. 3 приведен химический состав получаемого красного шлама. Прочие фиксированные параметры составляли продолжительность спекания 60 мин, массовое отношение NaOH к бокситу 1,0. Также в табл. 3 приведен химический состав красного шлама, получаемого в промышленности.

Повышение массового отношения боксита к щелочи также оказывает значительное влияние на степень извлечения алюминия при последующем выщелачивании спека, что связано с увеличением контактной поверхности и получением более высокомолекулярных алюминатных растворов.

Затем были исследованы физические свойства красных шламов (табл. 4), полученных при разных температурах спекания в сравнении с существующими отвальными красными шламами.

В результате самая высокая намагниченность и удельная площадь поверхности были получены при спекании боксита со щелочью при низких температурах. На рис. 2 показаны микрофотографии данных шламов, где видно, что они также состоят из частиц размером меньше 1 мкм. При спекании гематита без прочих примесей при 500°C удельная площадь поверхности твердого продукта составила лишь 6,0 м²/г.

В дальнейшем были проведены исследования на красном шламе, полученном при спекании боксита с каустической щелочью при T = 300°C (см. табл. 3), который затем был

подвергнут выщелачиванию водой при 80°C в течение 30 мин. Содержание в нем Na₂O составило 0,78%. Кроме того, было подтверждено наличие в данном шламе повышенного содержания редкоземельных элементов, мг/кг: Sc₂O₃ = 212; CeO₂ = 862; La₂O₃ = 365; Nd₂O₃ = 322; Nb₂O₅ = 241; Y₂O₃ = 196.

Физико-химические методы анализа показали, что практически все железо в данном продукте представлено маггемитом γ-Fe₂O₃, кроме того, было сделано предположение, что все минералы редкоземельных элементов, присутствующие в бокситовом сырье, после низкотемпературного спекания и выщелачивания спека становятся более легкодоступными для дальнейшего их извлечения с использованием слабокислотной обработки при pH = 3,5 растворами серной кислоты [15]. Извлечение их в раствор составило 80–90%. При нейтрализации полученных растворов щелочью или содой получается концентрат РЗМ, который можно отправить на поэтапное извлечение из него нужных редкоземельных металлов существующими способами [16–20].

Анализируя полученные результаты исследования, можно сделать следующие выводы:

– исследованы физико-химические свойства твердых остатков, полученных после водного выщелачивания спека гематита с каустической щелочью при 300, 500 и 700°C, что позволило определить наличие в конечном продукте в качестве основной фазы при 300 и 500°C маггемита, а при 700°C – оксида железа (III);

– установлено, что процесс растворения

Таблица 3. Химический состав красного шлама, полученного с использованием различных технологий
Table 3. Chemical composition of red mud obtained via different technologies

Тип красного шлама	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	CaO	ППП*
Способ Байера	5,16	13,3	53,21	12,04	5,48	5,98	4,20
Спекание со щелочью при 300°C	1,53	3,87	67,80	2,93	6,88	1,50	12,84
Спекание со щелочью при 400°C	2,50	7,02	66,83	5,30	6,78	1,48	7,10

*Потери при прокаливании.

Таблица 4. Физические свойства различных видов красного шлама
Table 4. Physical properties of various types of red mud

Красный шлам	Удельная площадь поверхности, м ² /г	Объем пор x10 ⁻³ , см ³ /г	VSM* намагниченность при 10 кОе, эму/г
Способ Байера	22,51	38,70	отсутствует
Спекание со щелочью при 300°C	54,97	76,40	19
Спекание со щелочью при 500°C	51,77	70,60	20
Спекание со щелочью при 700°C	6,40	13,30	отсутствует

*VSM – от англ. vibrating sample magnetometry.

основного глиноземсодержащего минерала – бемита – протекает в кинетической области и протекает менее, чем за 10 мин;

– показана принципиальная возможность переработки бокситового сырья на основе низкотемпературного спекания боксита с каустической щелочью;

– установлено, что наибольшее влияние на степень извлечения алюминия из бокситов при их спекании со щелочью оказывает температура и массовое отношение каустической щелочи к массе боксита;

– также исследование физико-химических характеристик красного шлама, получаемого при спекании бокситов с каустической щелочью, показало, что основной фазой железа является маггемит, представленный наноразмерными частицами, обладающими магнитными свойствами и высокой удельной площадью поверхности (более 50 м²/г), содержание оксида натрия в твердом продукте, полученном при оптимальных условиях, не превышает 1,5%;

– дополнительная обработка данного шлама

водой при температуре 80°C позволяет снизить содержание щелочи до 0,78% и отправить его на слабокислотную обработку серной кислотой с целью получения концентрата РЗМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных опытов низкотемпературного спекания основных компонентов бокситового сырья (бемита и гематита) были проведены исследования предлагаемой технологии на боксите Средне-Тиманского месторождения, изучены свойства полученных красных шламов и выявлено изменение их минералогического состава по сравнению с существующими шламами. Показаны возможность борьбы с выбросами углекислого газа на глиноземных заводах Урала и способ получения высокожелезистых магнитных шламов с повышенным содержанием в них РЗМ. При дальнейшей обработке таких шламов разбавленными растворами кислот редкоземельные элементы легко переходят в раствор, путем нейтрализации которого можно получить концентрат РЗМ.

Список источников

1. Сабирзянов Н.А., Яценко С.П. Гидрохимические способы комплексной переработки бокситов. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2006. 385 с. EDN: QMZSDP.
2. Лавренчук В.Н., Стряпков А.В., Коковин Е.Н. Скандий в бокситах и глинах: монография. Каменск-Уральский: Каменск-Уральская типография, 2004. 291 с.
3. Бибанаева С.А., Сабирзянов Н.А., Скачков В.М., Чуфаров А.Ю., Суриков В.Т., Лебедева Э.М., Ворсин В.А. Интенсификации процесса автоклавного выщелачивания бокситов различных месторождений // Актуальные вопросы современного материаловедения: матер. VI Междунар. молодеж. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 30 октября 2019 г.). Уфа: Башкирский государственный университет, 2020. С. 61–68. EDN: KLWNYW.
4. Троицкий И.А. Производство глинозема из бокситов. Технологические расчеты. М.: Metallurgia, 1972. 175 с.
5. Еремин Н.И., Наумчик А.Н., Казаков В.Г. Процессы и аппараты глиноземного производства. М.: Metallurgia, 1980. 360 с.
6. Kumar S., Kumar R., Bandopadhyay A. Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries // Resources, Conservation and Recycling. 2006. Vol. 48. Iss. 4. P. 301–314. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.03.003>.
7. Loginova I.V., Kyrchikov A.V., Lebedev V.A., Ordon S.F. Investigation into the question of complex processing of bauxites of the Srednetimanskoe deposit // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2013. Vol. 54. Iss. 2. P. 143–147. <https://doi.org/10.3103/S1067821213020089>.
8. Куличенко А. Углеродный след: главный экологический вопрос человечества // Русское горно-химическое общество. Режим доступа: <https://brucite.plus/articles/uglerodnyj-sled/> (дата обращения: 30.09.2023).
9. Saevarsdottir G., Kvande H., Welch B.J. Aluminum production in the times of climate change: the global challenge to reduce the carbon footprint and prevent carbon leakage // Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. 2020. Vol. 72. Iss. 1. P. 296–308. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03918-6>.
10. Saevarsdottir G., Kvande H., Welch B.J. Reducing the carbon footprint: aluminium smelting with changing energy systems and the risk of carbon leakage // Minerals, Metals and Materials Series / eds. A. Tomsett. Cham: Springer, 2020. P. 726–734. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36408-3_98.
11. Saevarsdottir G., Magnusson T., Kvande H. Reducing the carbon footprint: primary production of aluminum and silicon with changing energy systems // Journal of Sustainable Metallurgy. 2021. Vol. 7. Iss. 3. P. 848–857. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00429-0>.
12. Ткачев И., Котченко К. Россия заплатит ЕС €1,1 млрд в год углеродного налога // РБК. Режим доступа: <https://www.rbc.ru/economics/26/07/2021/60fac8469a7947d1f4871b47> (дата обращения: 30.09.2023).
13. Gillingham K., Stock J.H. The cost of reducing greenhouse gas emissions // Journal of Economic Perspectives. 2018. Vol. 32. Iss. 4. P. 53–72. <https://doi.org/10.1257/jep.32.4.53>.

14. Shoppert A., Loginova I., Rogozhnikov D., Karimov K., Chaikin L. Increased adsorption on maghemite-containing red mud prepared by the alkali fusion-leaching method // *Minerals*. 2019. Vol. 9. Iss. 1. <https://doi.org/10.3390/min9010060>.
15. Shoppert A., Loginova I., Napol'skikh J., Kyrchikov A., Chaikin L., Rogozhnikov D., Valeev D. Selective scandium (Sc) extraction from bauxite residue (red mud) obtained by alkali fusion-leaching method // *Processing and Characterization of Mineral Materials*. 2022. Vol. 15. Iss. 2. P. 433. <https://doi.org/10.3390/ma15020433>.
16. Zhaobo Liu, Li Hongxu, Jing Qiankun, Zhang Mingming. Recovery of scandium from leachate of sulfation-roasted Bayer red mud by liquid-liquid extraction // *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 2021. Vol. 69. Iss. 11. P. 2373–2378. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2518-0>.
17. Thomas H.C. Heterogeneous ion exchange in a flowing system // *Journal of the American Chemical Society*. 1944. Vol. 66. Iss. 10. P. 1664–1666. <https://doi.org/10.1021/ja01238a017>.
18. Rychkov V.N., Smirnov A.L., Nalivayko K.A., Titova S.M., Kirillov E.V. Kinetics of scandium sorption by phosphorus-containing ion exchanger purolite D5041 from hydrolysis sulfuric acid from titanium dioxide production // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2174. Iss. 1. P. 020054. <https://doi.org/10.1063/1.5134205>.
19. Bao Shenxu, Hawker W., Vaughan J. Scandium loading on chelating and solvent impregnated resin from sulfate solution // *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2017. Vol. 36. Iss. 1. P. 100–113. <https://doi.org/10.1080/07366299.2017.1412917>.
20. Li Wanyan, Li Zehai, Wang Ning, Gu Hannian. Selective extraction of rare earth elements from red mud using oxalic and sulfuric acids // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. Vol. 10. Iss. 6. P. 108650.

References

1. Sibirzyanov N.A., Yacenko S.P. *Hydrochemical methods of bauxite complex processing*. Ekaterinburg: Ural Branch of the RAS; 2006, 386 p. (In Russ.). EDN: QMZSDP.
2. Lavrenchuk V.N., Stryapkov A.V., Kokovin E.N. *Scandium in bauxites and clays*. Kamensk-Uralsky: Kamensk-Uralskaya tipografiya; 2004, 291 p. (In Russ.).
3. Bibanaeva S.A., Sabirzyanov N.A., Skachkov V.M., Chufarov A.Yu., Surikov V.T., Lebedeva E.M., Vorsin V.A. Intensification of pressure leaching of various deposit bauxites. In: *Aktual'nye voprosy sovremennogo materialovedeniya: materialy VI Mezhunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Current issues of modern materials science: materials of the 6th International youth scientific and practical conference*. 30 October 2019, Ufa. Ufa: Bashkir State University; 2020, p. 61–68. (In Russ.). EDN: KLWNYW.
4. Troitskiy I.A. *Production of alumina from bauxite. Technological calculations*. Moscow: Metallurgy; 1972, 175 p. (In Russ.).
5. Eremin N.I., Naumchik A.N., Kazakov V.G. *Alumina production processes and apparatus*. Moscow: Metallurgiya; 1980, 360 p. (In Russ.).
6. Kumar S., Kumar R., Bandopadhyay A. Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries. *Resources, Conservation and Recycling*. 2006;48(4):301–314. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.03.003>.
7. Loginova I.V., Kyrchikov A.V., Lebedev V.A., Ordon S.F. Investigation into the question of complex processing of bauxites of the Srednetimanskoe deposit. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2013;54(2):143–147. <https://doi.org/10.3103/S1067821213020089>.
8. Kulichenko A. Carbon footprint: the major environmental issue of humanity. *Russkoe gorno-himicheskoe obshchestvo*. Available from: <https://brucite.plus/articles/uglerodnyj-sled/> [Accessed 30th September 2023]. (In Russ.).
9. Saevarsdottir G., Kvande H., Welch B.J. Aluminum production in the times of climate change: the global challenge to reduce the carbon footprint and prevent carbon leakage. *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 2020;72(1):296–308. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03918-6>.
10. Saevarsdottir G., Kvande H., Welch B.J. Reducing the carbon footprint: aluminium smelting with changing energy systems and the risk of carbon leakage. In: Tomsett A. (eds.). *Minerals, Metals and Materials Series*. Cham: Springer; 2020, p. 726–734. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36408-3_98.
11. Saevarsdottir G., Magnusson T., Kvande H. Reducing the carbon footprint: primary production of aluminum and silicon with changing energy systems. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2021;7(3):848–857. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00429-0>.
12. Tkachev I., Kotchenko K. Russia will pay the European Union €1.1 billion per year in carbon tax. *RBK*. Available from: <https://www.rbc.ru/economics/26/07/2021/60fac8469a7947d1f4871b47> [Accessed 30th September 2023]. (In Russ.).
13. Gillingham K., Stock J.H. The cost of reducing greenhouse gas emissions. *Journal of Economic Perspectives*. 2018;32(4):53–72. <https://doi.org/10.1257/jep.32.4.53>.
14. Shoppert A., Loginova I., Rogozhnikov D., Karimov K., Chaikin L. Increased adsorption on maghemite-containing red mud prepared by the alkali fusion-leaching method. *Minerals*. 2019;9(1). <https://doi.org/10.3390/min9010060>.
15. Shoppert A., Loginova I., Napol'skikh J., Kyrchikov A., Chaikin L., Rogozhnikov D., Valeev D. Selective scandium (Sc) extraction from bauxite residue (red mud) obtained by alkali fusion-leaching method. *Processing and Characterization of Mineral Materials*. 2022;15(2):433. <https://doi.org/10.3390/ma15020433>.
16. Zhaobo Liu, Li Hongxu, Jing Qiankun, Zhang Mingming. Recovery of scandium from leachate of sulfation-roasted Bayer red mud by liquid-liquid extraction. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 2021;69(11):2373–2378. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2518-0>.
17. Thomas H.C. Heterogeneous ion exchange in a flowing system. *Journal of the American Chemical Society*. 1944;66(10):1664–

1666. <https://doi.org/10.1021/ja01238a017>.

18. Rychkov V.N., Smirnov A.L., Nalivayko K.A., Titova S.M., Kirillov E.V. Kinetics of scandium sorption by phosphorus-containing ion exchanger purolite D5041 from hydrolysis sulfuric acid from titanium dioxide production. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2174(1):020054. <https://doi.org/10.1063/1.5134205>.

19. Bao Shenxu, Hawker W., Vaughan J. Scandium loading on chelating and solvent impregnated resin from sulfate solution. *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2017;36(1):100-113. <https://doi.org/10.1080/07366299.2017.1412917>.

20. Li Wanyan, Li Zehai, Wang Ning, Gu Hannian. Selective extraction of rare earth elements from red mud using oxalic and sulfuric acids. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022;10(6):108650. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108650>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Логонова Ирина Викторовна,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
i.v.loginova@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1627-4634>

Кырчиков Алексей Владимирович,

к.т.н.,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
✉ a.v.kyrchikov@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5111-5041>

Чайкин Леонид Иванович,

к.т.н.,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
l.i.chaikin@urfu.ru

Напольских Юлия Александровна,

к.т.н.,
инженер I категории кафедры металлургии
цветных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
julia.napolskikh@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2034-7928>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 19.06.2023 г.;
одобрена после рецензирования 16.10.2023 г.;
принята к публикации 08.11.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina V. Loginova,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Non-ferrous Metals Metallurgy Department,
Ural Federal University named
after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
i.v.loginova@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1627-4634>

Aleksey V. Kyrchikov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the
Non-ferrous Metals Metallurgy Department,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
✉ a.v.kyrchikov@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5111-5041>

Leonid I. Chaikin,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Non-ferrous Metals
Metallurgy Department,
Ural Federal University named
after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
l.i.chaikin@urfu.ru

Yulia A. Napolskikh,

Cand. Sci. (Eng.),
1st Category Engineer of the Non-ferrous
Metals Metallurgy Department,
Ural Federal University named after the
first President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
julia.napolskikh@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2034-7928>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 19.06.2023;
approved after reviewing 16.10.2023;
accepted for publication 08.11.2023.



Научная статья
УДК 669.713.72, 667.621.33
EDN: YRJBRD
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-800-808

Снижение экологической нагрузки на окружающую среду при производстве алюминия за счёт применения нефтяного пека

Н.В. Немчинова^{1✉}, Н.П. Коновалов², П.Н. Коновалов³, И.О. Дошлов⁴

¹⁻⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель – разработка технологии получения нефтяного пека как связующего для анодной массы, используемой при электролитическом получении алюминия, из мазутов каталитического жидкофазного окислительного крекинга нефти. Для определения направления исследований в работе использовался анализ опубликованных данных о способах получения и свойствах нефтяного пека. Предложен способ получения нефтяных пеков методом каталитического жидкофазного окислительного крекинга нефтяного сырья с применением гетерогенных металлокомплексных катализаторов. Показано, что процесс получения данного пека состоит из нескольких стадий. К ним относятся: гомогенизация мазута и модифицирующей присадки; окислительный крекинг мазута в процессе нагрева гомогенизированного мазута в печи; каталитический жидкофазный окислительный крекинг мазута с удалением дистиллятов; ректификация светлых фракций; конденсация дистиллятов; сбор светлых нефтепродуктов; окисление воздухом и паром кубового остатка, удаление дистиллятов окисления и нефтяного пека; гранулирование пека. В результате сравнения полученного по предлагаемому методу нефтяного пека с каменноугольным пеком марки Б-1 производства АО «Алтай-кокс» установлено, что предлагаемый материал не уступает требованиям технологического регламента Красноярского алюминиевого завода компании РУСАЛ. Показано, что по содержанию серы предлагаемый пек превосходит каменноугольный пек. Согласно результатам исследований и испытаний, проведенных на алюминиевом предприятии, в нефтяном пеке не содержатся вредные полиароматические углеводороды, в частности, канцерогенный бенз(а)пирен. Таким образом, замена каменноугольного пека нефтяным дает технологические и экологические преимущества для производителей первичного алюминия, а также для предприятий, выпускающих различные углеродные материалы.

Ключевые слова: производство алюминия, экологическая безопасность, анод электролизера, анодная масса, нефтяной пек

Для цитирования: Немчинова Н.В., Коновалов Н.П., Коновалов П.Н., Дошлов И.О. Снижение экологической нагрузки на окружающую среду при производстве алюминия за счёт применения нефтяного пека // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 800–808. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-800-808>. EDN: YRJBRD.

METALLURGY

Original article

Reducing the environmental impact of aluminum production through the use of petroleum pitch

Nina V. Nemchinova^{1✉}, Nikolay P. Konovalov², Petr N. Konovalov³,
Ivan O. Doshlov⁴

¹⁻⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. This study is aimed at developing a technology for obtaining petroleum pitch as a binder for anode mass used in the electrolytic production of aluminum from fuel oils of catalytic liquid-phase oxidative oil cracking. A review of published data on the existing methods for obtaining petroleum pitch and its properties is carried out in order to define research directions. A method for producing petroleum pitch by catalytic liquid-phase oxidative cracking of crude oil using heterogeneous metal complex catalysts is proposed. The process of petroleum pitch production is shown to undergo several stages, including homogenization of fuel oil and modifying additives; oxidative cracking of fuel oil during heating of

homogenized fuel oil in a furnace; catalytic liquid-phase oxidative cracking of fuel oil with removal of distillates; rectification of light fractions; condensation of distillates; collection of light oil products; oxidation of bottom residues by air and steam; removal of oxidation distillates and petroleum pitch; and pitch pelletizing. According to the conducted comparison of the as-obtained petroleum pitch with the B-1 coal tar pitch produced by the Altai Koks JSC, the proposed material meets the technological requirements of the Krasnoyarsk Aluminum Plant of the RUSAL company. In terms of sulfur content, the proposed petroleum pitch is superior to coal tar pitch. The experiments conducted at an aluminum plant showed the petroleum pitch to contain no harmful polyaromatic hydrocarbons, in particular, carcinogenic benz(a)pyrene. Therefore, replacement of coal tar pitch with petroleum pitch could provide technological and environmental advantages for primary aluminum producers, as well as for enterprises producing various carbon materials.

Keywords: aluminum production, environmental safety, electrolyser anode, anode paste, petroleum pitch

For citation: Nemchinova N.V., Konovalov N.P., Konovalov P.N., Doshlov I.O. Reducing the environmental impact of aluminum production through the use of petroleum pitch. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):800-808. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-800-808>. EDN: YRJBRD.

ВВЕДЕНИЕ

Российская алюминиевая промышленность является одной из самых ведущих отраслей отечественной промышленности, крупнейшим производителем алюминия и изделий на его основе. Сотрудники предприятий и организаций компании «РУСАЛ», представители образовательных и научных организаций постоянно совершенствуют технологии получения глинозема, алюминия и алюминийсодержащих изделий, повышая при этом экономические показатели и предлагая пути решения экологических проблем металлургического производства [1–6].

Промышленный способ получения первичного алюминия – электролиз Al_2O_3 (глинозема) в расплаве Na_3AlF_6 (криолита) [7, 8]. В течение процесса в атмосферу корпуса и окружающую среду выделяются вредные вещества, неизбежно образующиеся в результате взаимодействия компонентов электролита и углерода анода при воздействии электрического тока и высокой температуры. К таким вредным соединениям относятся твердые и газообразные фториды, диоксид серы, полиароматические углеводороды, углекислый газ, твердые частицы сырьевых материалов и другие соединения. Объем образования таких веществ зависит от многих факторов, основные из которых – это тип и производительность ванны, производительность корпуса (цеха), ведения технологического режима в процессе электролитического получения металла, количества и качества используемого сырья и др.

Согласно обновленной Экологической политике РУСАЛ, принятой в 2022 г., компания уделяет особое внимание вопросам экологии⁵. В связи с этим на металлургических предприятиях компании, производящих глинозем, первичный алюминий, металлургический

кремний, готовую продукцию (на основе алюминия) проводятся различные мероприятия по решению экологических проблем [9].

КАМЕННОУГОЛЬНЫЙ ПЕК КАК СВЯЗУЮЩЕЕ ВЕЩЕСТВО В АЛЮМИНИЕВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Производители первичного алюминия являются крупнейшим потребителем углерода, около 90% идет на изготовление анодной массы, используемой на ваннах с самообжигающимися анодами (анодами Содерберга) и для производства обожженных анодов (ОА); ~65% заводов компании работают на электролизерах такого типа [10]. Но в последние годы компания ведет масштабную реконструкцию предприятий, оснащая корпуса ваннами типа ЭкоСодерберг [11, 12], а новые строящиеся корпуса – ваннами с ОА.

Одним из основных конструктивных элементов электролизера для получения алюминия является анод. Анодная масса загружается непосредственно в электролизер, и при прохождении электрического тока по стальным штырям, удерживающих массу в анодном устройстве, формируется электропроводный анод, участвующий в электрохимическом процессе. Также из анодной массы изготавливают обожженные анодные блоки, которые монтируются в анодно-монтажном отделении алюминиевого завода и в готовом виде выступают участниками электролиза криолит-глиноземного расплава [13].

Электродным материалом, из которого формируются самообжигающиеся и обожженные аноды, является анодная масса, состоящая из кокса-наполнителя (в количестве ~70%) и связующего вещества, в качестве которого в настоящее время на алюминиевых предприятиях используется каменноуголь-

⁵Охрана окружающей среды // Русал. Режим доступа: <https://rusal.ru/sustainability/environmental-protection/> (дата обращения: 18.07.2023).

ный пек⁶ [14, 15]. Пековый или нефтяной коксы используются в качестве твердой части шихты для анодной массы.

Каменноугольный пек – это продукт коксохимического производства, образующийся как остаток при дистилляции каменноугольной смолы при 360°C. Данный остаток представляет собой ароматические углеводороды, некоторые из которых являются канцерогенными веществами [8, 14, 16, 17]. В целом расход углеродного сырья на 1 т алюминия составляет 410–530 кг. В каменноугольном пеке содержатся полиароматические углеводороды, среди которых бензоантрацен, бенз(а)пирен и дибензантрацен являются наиболее опасными (о чем имеется информация в «Российском регистре потенциально опасных химических и биологических веществ»). Допустимая концентрация канцерогенного бенз(а)пирена в атмосфере не должна превышать 10^{-9} г/м³ ^{7,8} [18].

Повышенное содержание примесей в каменноугольных пеках, а также несоответствие группы показателей требованиям алюминиевой промышленности, отрицательно сказывается как на качестве конечной продукции (из-за попадания в электролит различных элементов, следовательно, в алюминий-сырец), так и на экологических показателях алюминиевых предприятий (из-за выбросов в атмосферу вредных веществ).

Одним из перспективных направлений совершенствования алюминиевого производства и решения экологических проблем является замена каменноугольного пека нефтяным.

НЕФТЯНОЙ ПЕК КАК АЛЬТЕРНАТИВНОЕ СВЯЗУЮЩЕЕ

Нефтяные пеки по своим характеристикам могут выступить в качестве альтернативы каменноугольному пеку в роли связующего при изготовлении углеродной продукции и обеспечить необходимые свойства (однородность, пластичность, текучесть и реакционную способность) для последующих стадий обжига различных углеродных изделий.

Ценным сырьем, но пока еще не вовле-

ченным в производство нефтяного пека, является мазут, полученный после каталитического жидкофазного окислительного крекинга нефти. Низкое содержание бен(а)пиренов и других ароматических углеводородов в составе мазута является предпосылкой получения нефтяного пека с улучшенными экологическими показателями для любого производства при их использовании.

Первые попытки получения нефтяного пека были сделаны в середине XX в. зарубежными фирмами «Ashland Petroleum» (США), «Kyreha», (Япония), «Rutgers Chemical GmbH» (Германия), «Intever» (Венесуэла), Marathon Ashland Petroleum, «Petroleum Chemical Corporation» (Австралия), «United States Steel Corporation» (США), «Gulf Oil Canada Ltd» (Шеридан Парк, США), «Mobile Oil Corporation» (Полсбаро, Нью Джерси) [15, 19].

Нефтяные пеки применяли на предприятиях США, Канады, Германии, Китая, Японии. Исходным сырьем для получения данного вида пека служили нефтяные остатки после каталитического крекинга, а ароматические вещества концентрировали экстракцией фурфуролом. Данный процесс состоит из двух ступеней термообработки. Полагают, что низкое содержание β-фракции в продукте по отношению к его коксовому остатку, соотношению С/Н и плотности, связано с высоким содержанием ароматических веществ в сырье, получаемом при экстракции фурфуролом [20, 21].

Обзор производственной деятельности зарубежных фирм по выпуску нефтяных пеков показывает, что многие из них, в связи с производственной задачей и необходимостью снижения негативного влияния на окружающую среду, перешли на производство гибридных связующих (нефтяных и каменноугольных) в соотношении 50:50, кроме волокнообразующих. Производство пека для углекомполитов за рубежом возрастает на 50–60% ежегодно, кроме России.

Для оценки применимости пека в различных областях рассматривают его характеристики, такие как температура размягчения, содержание нерастворимых в бензоле и хинолине

⁶ГОСТ 10200-2017. Пек каменноугольный электродный. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2018. 10 с.

⁷Вредные вещества в промышленности: справочник для химиков, инженеров и врачей. 7-е изд., перераб. и доп. В 3 т. Т. 1. Органические вещества / под ред. Н.В. Лазарева, Э.Н. Левиной. Л.: Химия, 1976. 592 с.

⁸Вредные вещества в промышленности: справочник для химиков, инженеров и врачей. 7-е изд., перераб. и доп. В 3 т. Т. 2. Органические вещества / под ред. Н.В. Лазарева, Э.Н. Левиной. Л.: Химия, 1976. 314 с.

соединений, коксовый остаток, величину пикнометрической плотности, соотношение содержания основных элементов (С, Н и S). Температура размягчения пеков бывает разной и находится в температурном интервале от 79 до 126°С⁹ [22].

Исследования, проведенные в Государственном унитарном предприятии «Институт нефтепереработки Республики Башкортостан» И.Р. Хайрудиновым, Н.С. Гаскаровым, Р.Х. Садыковым в 1985–1995 гг. на базе АО «Ново-Уфимский нефтеперерабатывающий завод», позволили внедрить в промышленность производство нефтяных пеков, которые явились пригодными для российских предприятий – производителей первичного алюминия. Данное производство было организовано путем вакуумной перегонки крекингостатка на установке термокрекинга ТК-3 [20]. В год возможно было получить до 20 тыс. т продукта. Данный нефтяной пек в течение 6 лет проходил промышленные испытания на нескольких предприятиях (Братский и Саяногорский алюминиевые заводы, Новосибирский электродный завод и Челябинский электрометаллургический комбинат). Однако было показано, что данный пек целесообразно применять в смеси с традиционным каменноугольным [23], т.к. при использовании для производства анодной массы в качестве единственного связующего он показал неудовлетворительные результаты по основным показателям, кроме разрушаемости в токе СО₂.

При карбонизации нефтяных пеков размеры сферолитов увеличиваются более интенсивно, что вызвано меньшим содержанием в них α₁-фракции. Применение нефтяных пеков в пекококсовых композициях значительно меняет их свойства, придает большую пластичность, снижает вязкость [24]. Кроме того, заметно повышается степень заполнения открытых пор и снижается удельное электросопротивление композитов.

Кроме технологических преимуществ, нефтяные пеки значительно в меньшем количестве в своем составе содержат канцерогенные вещества. Так, концентрация бенз(а)пирена (по результатам исследования, проведенного

авторами [25]) в пеках из крекинг-остатков составляет 0,04–0,15%, в то время как в пиролизных пеках этот показатель выше и лежит в диапазоне 0,3–0,8%.

Гигиеническая оценка нефтяных пеков, по данным работы [20], показала, что при замене каменноугольного пека нефтяным средние концентрации бенз(а)пирена в воздухе в корпусах электролиза с ваннами с анодами Содерберга на основе нефтяного пека снижаются в 1,3–8,8 раза, в сметенной пыли в 7–24,3 раза, а в отходящих от электролизеров газах в 5,8 раза.

Таким образом, замена каменноугольного пека нефтяным дает значительные технологические и экологические выгоды для предприятий, выпускающих конструкционные материалы, графитированные электроды, электроугольные материалы, пекококсовые композиты, а также для алюминиевых предприятий.

Целью работы явилось исследование характеристик мазутов каталитического жидкофазного окислительного крекинга нефти и разработка технологии получения нефтяного пека со свойствами, не уступающими характеристикам каменноугольного пека для дальнейшего применения как связующего материала в производстве анодов и электродов для алюминиевой промышленности.

ПРОИЗВОДСТВО НЕФТЯНОГО ПЕКА МЕТОДОМ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ЖИДКОФАЗНОГО ОКИСЛИТЕЛЬНОГО КРЕКИНГА

Нефтяные пеки можно производить различными способами: термополиконденсацией, вакуумной дистилляцией, компаундированием, пластификацией, термостатированием, термоокислением¹⁰.

В качестве сырьевых источников для производства нефтяных пеков применяют продукты пиролиза и крекинга нефти. Однако они не обладают удовлетворительными значениями вязкости, коксуемости, выхода летучих веществ, а также имеют малую адгезионную способность. В связи с этим необходимы мероприятия по изменению их химического состава

⁹Лысова Г.А. Научное обоснование и разработка требований к качеству нефтяных связующих материалов для производства графитированных электродов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07. Челябинск, 2003. 126 с.

¹⁰ИТС 30-2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Переработка нефти. М.: Бюро НДТ, 2017. 635 с.

и физико-химических характеристик.

Как указывал автор¹¹ в своем диссертационном исследовании, в процессе термодеструктивных термополиконденсационных преобразований из сырья формируется мезогенный углеродный материал, при температурах выше 400°C создающий в расплаве подвижную мезофазу, которая распределяется между частицами наполнителя, формируя в дальнейшем жидкокристаллическую связку. На основе данной связки образуются электродные композиты или другие изделия, получаемые из пекококсовых композиций.

Нами предлагается способ получения нефтяных пеков методом каталитического жидкофазного окислительного крекинга (КЖОК) нефтяного сырья с применением гетерогенных металлокомплексных катализаторов. Каталитический жидкофазный окислительный крекинг мазута основан на использовании физико-химических и дисперсных свойств мазута, полученного в процессе переработки

нефти, а также применением комплексообразующих добавок, которые способствуют увеличению поликонденсированных ароматических соединений, тем самым увеличивая соотношение С/Н.

Процесс получения нефтяного пека состоит из следующих стадий (установка приведена на рисунке):

- гомогенизации мазута и модифицирующей присадки;
- окислительного крекинга мазута в процессе нагрева гомогенизированного мазута в печи;
- каталитического жидкофазного окислительного крекинга мазута с удалением дистиллятов;
- ректификации светлых фракций;
- конденсации дистиллятов;
- сбора светлых нефтепродуктов;
- окисления воздухом и паром кубового остатка, удаление дистиллятов окисления и нефтяного пека;
- гранулирования пека.

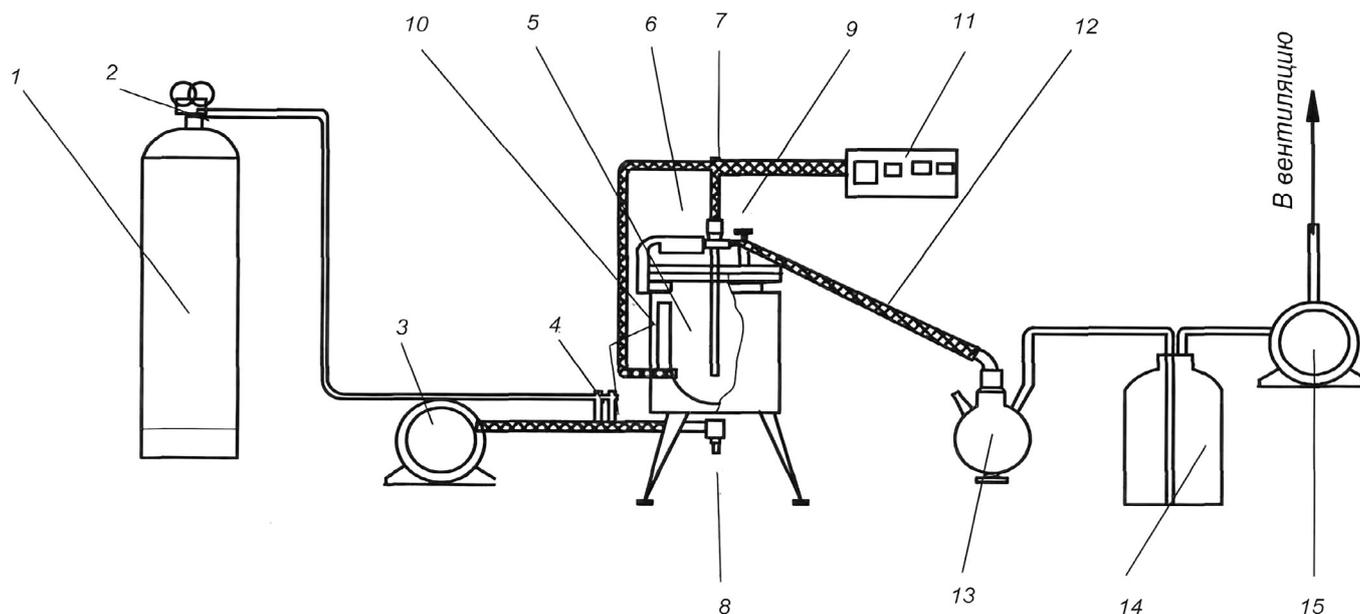


Схема экспериментальной установки для получения нефтяного пека:

- 1 – баллон с воздухом; 2 – редуктор; 3 – пароперегреватель;
4 – тройник-вентиль; 5 – автоклав; 6 – манометр;
7 – термодатчик; 8 – нижний вентиль; 9 – верхний вентиль;
10 – рубашка автоклава; 11 – блок терморегуляции;
12 – теплообменник; 13 – приемная емкость;
14 – каплеотбойник; 15 – газовые часы [26]

Diagram of the experimental installation for petroleum pitch production:

- 1 – air cylinder; 2 – reducer; 3 – steam superheater; 4 – Tee valve;
5 – autoclave; 6 – pressure gauge; 7 – thermal sensor;
8 – bottom valve; 9 – top valve; 10 – autoclave jacket; 11 – thermal control unit;
12 – heat exchanger; 13 – receiving container; 14 – drip eliminator; 15 – gas clock [26]

¹¹Туманян И.Б. Интенсификация процесса термолиза нефтяного остаточного сырья: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Москва, 2008. 177 с.

Сравнение характеристик пеков с требованиями технологического регламента Красноярского алюминиевого завода
Comparison of pitch characteristics with the requirements of the Krasnoyarsk Aluminum Smelter technological regulations

Наименование характеристики	Ед. изм.	Требования КраЗ	Каменноугольный пек Б-1, АО «Алтай-кокс»	Протокол испытаний № 429 от 07.11.2018, нефтяной кокс
1. Температура размягчения (Меттлер)	°С	110–117	74	108,4
2. Температура размягчения (кольцо и стержень)	°С	85–92	–	82
3. Вязкость при 155°С	сПз	1500–5000	800	2499
4. Вязкость при 185°С	сПз	300–550	146	497
5. Коксовый остаток, не менее	%	55,0	53	57,7
6. Летучие, не более	%	53–59	59	56,9
7. Вещества, нерастворимые в толуоле (α ₁ -фракция)	%	29,0	28	28
8. Зольность, не более	%	0,3	0,1	0,10
9. Вещества, нерастворимые в хинолине (α ₁ -фракция)	%	5–12	7	5
10. Содержание бенз(а)пирена	мг/г	0,5	–	Следы
11. Сера, не более	%	0,7	0,51	1,43
12. Натрий, не более	%	0,022	0,011	0,002

Были проведены исследования свойств и характеристик полученного нефтяного пека на Красноярском алюминиевом заводе (КраЗе). Результаты сравнения свойств представлены в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Производство алюминия сопровождается выделением в атмосферу корпуса и окружающий воздух вредных веществ. Частичная замена традиционного каменноугольного пека нефтяным, полученным каталитическим жидкофазным окислительным крекингом, решает ряд экологических и экономических проблем электролитического получения алюминия. Использование нефтяного пека в качестве связующего в анодной массе, применяемой для получения обожженных анодов и анодной массы, а также различной углеродной продукции (конструкционные материалы, графитированные электроды, электроугольные материалы и пекококсовые композиты)

позволит снизить более чем в десять раз выбросы канцерогенных полиароматических веществ. Это даст возможность уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду и вредное воздействие на здоровье людей, а также позволит снизить экологические штрафы промышленных предприятий, использующих каменноугольный пек. С точки зрения решения экономических проблем при отлаженном производстве отечественного нефтяного пека исчезнет необходимость приобретения импортного каменноугольного пека, цена которого достигает 650 долл США за 1 т, а доля использования которого составляет 40–45% от всего объема, потребляемого в России. При равной или меньшей стоимости производства нефтяного пека, по сравнению со стоимостью ввозимого импортного каменноугольного пека, рентабельность разработанной технологии при крупнотоннажном производстве будет иметь положительную динамику.

Список источников

1. Mann V., Buzunov V., Pitertsev N., Chesnyak V., Polyakov P. Reduction in power consumption at UC RUSAL's smelters 2012–2014 // *Light Metals* / eds. M. Hyland. Cham: Springer, 2015. P. 757–762. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_128.
2. Напалков В.И., Баранов В.Н., Фролов В.Ф. Лигатуры алюминиевые: структура и назначение: монография. Красноярск: СФУ, 2019. 176 с.
3. Dubovikov O.A., Brichkin V.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production // *Non-ferrous Metals*. 2018. No. 2. P. 11–16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>. EDN: VAYILV
4. Nemchinova N.V., Barauskas A.E., Tyutrin A.A., Vologin V.S. Processing finely dispersed technogenic raw materials for aluminum production in order to extract valuable components // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021. Vol. 62. No. 6.

- P. 659–667. <https://doi.org/10.3103/S1067821221060158>. EDN: RHWKMQ.
5. Patrin R.K., Bazhin V.Yu. Spent linings from aluminum cells as a raw material for the metallurgical, chemical, and construction industries // *Metallurgist*. 2014. Vol. 58. Iss. 7-8. P. 625–629. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9967-2>.
6. Бурдонов А.Е., Зелинская Е.В., Гавриленко Л.В., Гавриленко А.А. Изучение вещественного состава глиноземсодержащего материала алюминиевых электролизеров для использования в технологии первичного алюминия // *Цветные металлы*. 2018. № 3. С. 32–38. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>.
7. Grjotheim K., Kvande H. Introduction to aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1993. 260 p.
8. Борисоглебский Ю.В., Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я., Сиразутдинов Г.А. *Металлургия алюминия*. Новосибирск: Наука, 1999. 438 с.
9. Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental aspects of UC RUSAL's aluminum smelters sustainable development // *Light Metals* / eds. C. Chesonis. Cham: Springer, 2019. P. 553–563. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70.
10. Хайрудинов И.Р., Тихонов А.А., Таушев В.В., Теляшев Э.Г. Современное состояние и перспективы развития термических процессов переработки нефтяного сырья. Уфа: ГУП ИНХП РБ, 2015. 328 с. EDN: IGKCDX.
11. Виноградов А.М., Пинаев А.А., Виноградов Д.А., Пузин А.В., Шадрин В.Г., Зорько Н.В., Сомов В.В. Повышение эффективности укрытия электролизеров Содерберга // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2017. № 1. С. 19–30. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>.
12. Buzunov V., Mann V., Chichuk E., Frizorger V., Pinaev A., Nikitin E. The first results of the industrial application of the EcoSoderberg technology at the Krasnoyarsk aluminium smelter // *Light metals*. 2013. P. 573–576. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch98>.
13. Янко Э.А. Аноды алюминиевых электролизеров. М.: Руда и металлы, 2001. 671 с.
14. Сидоров О.Ф., Селезнёв А.Н. Перспективы производства и совершенствования потребительских свойств каменноугольных электродных пеков // *Российский химический журнал*. 2006. Т. 50. № 1. С. 16–24. EDN: GZQCPJ.
15. Привалов В.Е., Степаненко М.А. Каменноугольный пек: получение, переработка, применение. М.: Металлургия, 1981. 208 с.
16. Аншиц А.Г., Куртеева Л.И., Цыганова С.И., Суздорф А.Р., Аншиц Н.Н., Морозов С.В. Сравнительная оценка эмиссии канцерогенных веществ при использовании средне- и высокотемпературных пеков в производстве алюминия в электролизерах Содерберга // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2001. № 9. С. 345–352.
17. Храменко С.А., Анушенков А.Н., Маракушина Е.Н., Третьяков Я.А. Оценка эмиссии полиароматических углеводородов с поверхности анодов Содерберга // *Цветные металлы*. 2012. № 6. С. 34–37.
18. Дошлов О.И., Кондратьев В.В., Угапьев А.А. Влияние тяжелой смолы пиролиза на свойства анодной массы // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2013. № 2. С. 67–75.
19. Фитцер Э., Дифендорф Р., Калинин И. Углеродные волокна и углекомпозиаты / пер. с англ.; под ред. Э. Фитцера. М.: Мир, 1988. 336 с.
20. Хайрудинов И.Р., Садыков Р.Х., Гаскаров Н.С., Султанов Ф.М. Перспективы производства нефтяных пеков из различных видов сырья // *Цветные металлы*. 1993. № 7. С. 24–25.
21. Хайрудинов И.Р., Ахметов М.М., Теляшев Э.Г. Состояние и перспективы развития производства кокса и пека из нефтяного сырья // *Российский химический журнал*. 2006. Т. 50. № 1. С. 25–28.
22. Нешев А.В., Будник В.А., Хайбуллин А.А., Муратшин Р.Р. Сравнение требований к качеству нефтяных и каменноугольных пеков для электродной промышленности // *Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт*. 2011. № 11. С. 50–57. EDN: ONCTLP.
23. Мухамедзянова А.А., Бейлина Н.Ю. О создании в России производства нефтяных коксов и пеков-прекурсоров углеродных композиционных материалов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2018. № 4-2. С. 109–116. EDN: XXRULJ.
24. Дошлов О.И., Кондратьев В.В., Угапьев А.А., Ким И.В. Применение метода компаундирования для производства связующих материалов для алюминиевой промышленности // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2014. № 2. С. 31–41.
25. Дошлов О.И., Дошлов И.О. О перспективах производства нефтяных вяжущих в ОАО «Ангарская нефтехимическая компания» // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 5. С. 141–146. EDN: TVQUNP.
26. Дошлов И.О., Горяшин Н.А., Кузора И.Е. Нефтяной пек из высокоароматизированного мазута // *Нефть и газ: сб. тр. 74-й Междунар. молодежной науч. конф. (г. Москва, 28 сентября – 04 октября 2020 г.)*. М.: Российский гос. ун-т нефти и газа (нац. иссл. ун-т) им. И.М. Губкина, 2020. С. 166–174. EDN: KCKCWR.

References

1. Mann V., Buzunov V., Pitertsev N., Chesnyak V., Polyakov P. Reduction in power consumption at UC RUSAL's smelters 2012–2014. In: Hyland M. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2015, p. 757-762. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_128.

2. Napalkov V.I., Baranov V.N., Frolov V.F. *Aluminum ligatures: structure and purpose*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2019, 176 p. (In Russ.).
3. Dubovikov O.A., Brichkin V.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production. *Non-ferrous Metals*. 2018;2:11-16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>. EDN: VAYILV.
4. Nemchinova N.V., Barauskas A.E., Tyutrin A.A., Vologin V.S. Processing finely dispersed technogenic raw materials for aluminum production in order to extract valuable components. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021;62(6):659-667. <https://doi.org/10.3103/S1067821221060158>. EDN: RHWKMQ.
5. Patrín R.K., Bazhin V.Yu. Spent linings from aluminum cells as a raw material for the metallurgical, chemical, and construction industries. *Metallurgist*. 2014;58(7-8):625-629. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9967-2>.
6. Burdonov A.E., Zelinskaya E.V., Gavrilenko L.V., Gavrilenko A.A. Investigation of substantial composition of alumina-bearing material of aluminium electrolyzers for usage in primary aluminium technology. *Tsvetnye Metally*. 2018;3:32–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>.
7. Grjotheim K., Kvande H. *Introduction to aluminium electrolysis*. Düsseldorf: Aluminium-Verlag; 1993, 260 p.
8. Borisoglebskij Yu.V., Galevskij G.V., Kulagin N.M., Mincis M.Ya., Sirazutdinov G.A. *Aluminum metallurgy*. Novosibirsk: Nauka; 1999, 438 p. (In Russ.).
9. Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental aspects of UC RUSAL's aluminum smelters sustainable development. In: Chesonis C. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2019, p. 553-563. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70.
10. Hajrudinov I.R., Tihonov A.A., Taushev V.V., Telyashev E.G. *Current state and development prospects of thermal processes of petroleum processing*. Ufa: Institute of Petroleum Refining and Petrochemistry; 2015, 328 p. (In Russ.). EDN: IGKCDX.
11. Vinogradov A.M., Pinaev A.A., Vinogradov D.A., Puzin A.V., Shadrin V.G., Zor'ko N.V., Somov V.V. Increasing hooding efficiency of Soderberg cells. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2017;(1):19-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>.
12. Buzunov V., Mann V., Chichuk E., Frizorger V., Pinaev A., Nikitin E. The first results of the industrial application of the EcoSoderberg technology at the Krasnoyarsk aluminium smelter. *Light metals*. 2013;573-576. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch98>.
13. Yanko E.A. *Aluminum electrolyser anodes*. Moscow: Ruda i metally; 2001, 671 p. (In Russ.).
14. Sidorov O.F., Seleznyov A.N. Prospects for the production and consumer property improvement of coal electrode pitches. *Rossiiskij himicheskij zhurnal*. 2006;50(1):16-24. EDN: GZQCPJ.
15. Privalov V.E., Stepanenko M.A. *Coal tar pitch: production, processing, application*. Moscow: Metallurgiya; 1981, 208 p. (In Russ.).
16. Anshitz A.G., Kurteeva L.I., Cyganova S.I., Suzdorf A.R., Anshic N.N., Morozov S.V. *Comparative assessment of carcinogenic substance emission when using medium- and high-temperature pitches in aluminum production in Soderberg electrolyzers. Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya = Chemistry for Sustainable Development*. 2001;9:345-352. (In Russ.).
17. Khramenko S.A., Anushenkov A.N., Marakushina E.N., Tret'yakov Ya.A. Estimation of polyaromatic hydrocarbon emission from the Soderberg anode surfaces. *Tsvetnye Metally*. 2012;6:34-37. (In Russ.).
18. Doshlov O.I., Kondratiev V.V., Ugapyev A.A. Heavy pyrolysis tar effect on characteristics of anode mass. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2013;2:67-75. (In Russ.).
19. Fitzer E., Difendorf R., Kalinin I. *Carbon fibers and carbon composites*, 1988. 336 p. (Russ. ed.: *Uglerodnye volokna i uglekompozity*. Moscow, Mir; 1988, 336 p.)
20. Khajrudinov I.R., Sadykov R.H., Gaskarov N.S., Sultanov F.M. Production prospects of petroleum pitches from various types of raw materials. *Tsvetnye Metally*. 1993;7:24-25. (In Russ.).
21. Khajrudinov I.R., Akhmetov M.M., Telyashev E.G. State and development prospects of coke and pitch production from petroleum raw materials. *Rossiiskij himicheskij zhurnal*. 2006;L(1):25-28. (In Russ.).
22. Neshev A.V., Budnik V.A., Khajbullin A.A., Muratshin R.R. Comparing quality requirements for petroleum and coal tar pitches for the electrode industry. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tehnicheskie dostizheniya i peredovoj opyt*. 2011;11:50-57. (In Russ.). EDN: ONCTLP.
23. Mukhamedzianova A.A., Beylina N.Yu. About creation in Russia productions oil coke and pitches – precursors carbon composite materials. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. 2018;4-2:109-116. (In Russ.). EDN: XXRULJ.
24. Doshlov O.I., Kondratiev V.V., Ugapyev A.A., Kim I.V. Application of compounding technique for aluminum industry binder material production. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2014;2:31-41. (In Russ.).
25. Doshlov O.I., Doshlov I.O. On production prospects of oil binders in JSC "Angarsk petrochemical company". *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;5:141-

146. (In Russ.). EDN: TVQUNP.

26. Doshlov I.O., Goryashin N.A., Kuzora I.E. Petroleum pitch from highly aromatic fuel oil. In: *Neff' i gaz: sbornik trudov 74-j Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii = Oil and gas: collected articles of the 74th International youth scientific conference*. 28 September – 4 October 2020. Moscow: Gubkin University. National University of Oil and Gas; 2020, p. 166-174. (In Russ.). EDN: KCKCWR.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Немчинова Нина Владимировна,

д.т.н., профессор,
заведующая кафедрой металлургии
цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83
✉ ninavn@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

Коновалов Николай Петрович,

д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой физики,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
knp@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-6786-2711>

Коновалов Пётр Николаевич,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры физики,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
iskpn@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3005-6577>

Дошлов Иван Олегович,

аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
doshlov125@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Немчинова Нина Владимировна является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2000 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.09.2023 г.;
одобрена после рецензирования 30.09.2023 г.;
принята к публикации 01.10.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nina V. Nemchinova,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ ninavn@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

Nikolay P. Konovalov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Physics,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
knp@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-6786-2711>

Petr N. Konovalov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Physics,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
iskpn@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3005-6577>

Ivan O. Doshlov,

Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
doshlov125@mail.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

Nina V. Nemchinova has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2000, but she was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors did not report any other conflicts of interest.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 01.09.2023;
approved after reviewing 30.09.2023;
accepted for publication 01.10.2023.



Научная статья
УДК 669.213.3
EDN: XVGAMM
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-809-820

Сравнение способов повышения извлечения золота из золотосодержащих концентратов двойной упорности в технологии автоклавного окисления

Г.В. Петров^{1✉}, Д.В. Гордеев², В.Р. Бекирова³

¹⁻³Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия

Резюме. Цель исследования заключалась в поиске наиболее универсальной и оптимальной технологии, которая позволит значительно минимизировать влияние органического углерода на извлечение золота из дважды упорного сырья. В работе были протестированы 3 дважды упорных золотосульфидных концентрата различных месторождений с содержанием золота от 23,5 до 40,9 г/т и с содержанием общего углерода в материале от 1,2 до 9,5% масс. Термическая обработка проводилась в трубчатой вращающейся печи, обеспечивающей постоянное поддержание заданной температуры в реакторе и скорости вращения. Измельчение исходного концентрата проводили в виде пульпы в планетарной мельнице Pulverisette 6 «Fritsch». Автоклавное окисление – в титановых автоклавах Premex и Büchi. Установлено, что наиболее эффективной является технология автоклавного окисления с добавкой вторичного окислителя, поскольку с ее помощью возможно добиться увеличения извлечения золота до 97%. Также технология высокотемпературного автоклавного окисления продемонстрировала высокие показатели, однако для их достижения необходимо значительное увеличение времени пребывания материала в автоклаве (до 120 мин) при повышенных температурах. Показано, что термическая обработка в целом позволяет добиться небольшого прироста в извлечении золота (до 4%), и ее можно рассматривать как дополнительный передел совместно с другой технологией из проанализированных в данной работе, но не в качестве самостоятельного технологического решения. Проведенные исследования выявили, что предварительная термическая обработка концентратов, поступающих на автоклавное окисление, показывает положительный эффект; высокотемпературное автоклавное окисление концентратов с различным содержанием углерода позволяет обеспечить высокое извлечение золота для высокоуглеродистых концентратов; использование вторичного окислителя (в виде азотной кислоты) также оказывает положительное влияние на извлечение золота. Высокая эффективность технологии применительно к концентратам с различным содержанием углеродистого вещества позволяет рекомендовать ее для проведения дальнейших исследований.

Ключевые слова: золото, упорные руды, preg-robbing, термическая обработка, азотная кислота, углерод

Для цитирования: Петров Г.В., Гордеев Д.В., Бекирова В.Р. Сравнение способов повышения извлечения золота из золотосодержащих концентратов двойной упорности в технологии автоклавного окисления // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 809–820. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-809-820>. EDN: XVGAMM.

METALLURGY

Original article

Comparison of methods for enhancing gold recovery from double refractory concentrates using the technology of autoclave oxidation

Georgii V. Petrov^{1✉}, Daniil V. Gordeev², Veronika R. Bekirova³

¹⁻³Saint Petersburg Mining University named after the Empress Catherine II, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The study aims to investigate the most efficient method for significant minimization of the impact of organic carbon on gold recovery from double refractory raw materials. We tested three double refractory gold-sulfide concentrates from different deposits with the content of gold from 23.5 to 40.9 g/t and total carbon from 1.2 to 9.5 wt %. Thermal treatment was carried out in a tubular rotary furnace that provided permanent temperature setting and rotation speed in the

© Петров Г.В., Гордеев Д.В., Бекирова В.Р., 2023

reactor. The initial concentrate was grinded as pulp in a Fritsch planetary mono mill Pulverisette 6. Autoclave oxidation was performed in Premex and Büchi titanium autoclaves. The technology of autoclave oxidation with the addition of a secondary oxidizer was found to be the most efficient, since it can increase gold recovery up to 97%. Another technology – high-temperature autoclave oxidation – also proved high performance; however, a significant increase in the residence time of the material in the autoclave (up to 120 min) at elevated temperatures is required to achieve this performance. According to the results, thermal treatment in general can provide a small increase in gold recovery (up to 4%). Due to this, it can be used as an additional processing with other methods analyzed in this article rather than as a self-sufficient technological solution. The studies revealed that the preliminary thermal treatment of concentrates entering autoclave oxidation shows a positive effect; high-temperature autoclave oxidation of concentrates with different carbon content provides high gold recovery for high-carbon concentrates; the use of a secondary oxidizer (in the form of nitric acid) also benefits the gold recovery. The high efficiency of the technology for concentrates with different carbon content allows us to recommend it for further research.

Keywords: gold, refractory ores, preg-robbing, heat treatment, nitric acid, carbon

For citation: Petrov G.V., Gordeev D.V., Bekirova V.R. Comparison of methods for enhancing gold recovery from double refractory concentrates using the technology of autoclave oxidation. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):809-820. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-809-820>. EDN: XVGAMM.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость более эффективного извлечения золота из золотосодержащих руд двойной упорности [1–3] привела к разработке различных технологий обработки таких материалов [4–6].

Существуют две наиболее частые причины, приводящие к упорности золотосодержащих руд [7–10]. Во-первых, процесс извлечения золота может быть затруднен из-за связывания золота с сульфидными минералами, такими как пирит или арсенопирит [6–8]. Во-вторых, наличие органического углерода или углеродистых веществ может вызвать процесс preg-robbing [11–12], когда растворимые комплексы золота адсорбируются на поверхности углеродистого вещества [13–15], что снижает извлечение золота [16–18]. Тем не менее благодаря инновационным технологиям, научным исследованиям и современному оборудованию, эффективное извлечение золота становится возможным, даже при наличии сульфидов или органического углерода [19–21].

Извлечение золота из золотосодержащих руд двойной упорности является сложным процессом [22–24], который требует применения различных технологий и методов обработки [25–27]. В настоящее время наиболее перспективным и широко применяемым является автоклавное окисление [28–30].

Опыт современных автоклавных предприятий по переработке упорного сырья, содержащего золото, свидетельствует о том, что технология автоклавного окисления позволяет весьма эффективно перерабатывать не только упорные сульфидные концентраты, но и

золотосодержащее сырье двойной упорности [15, 19, 20]. Вместе с тем известно, что упорное золотосодержащее сырье разных месторождений может заметно отличаться свойствами сульфидов и углеродистого вещества [31–33]. Как правило, технологии современных автоклавных предприятий позволяют перерабатывать упорные золотосодержащие концентраты большинства месторождений с высоким извлечением золота [34–37], однако переработка высокоуглеродистого сырья некоторых месторождений затруднена, недостаточно эффективна или вообще исключена.

В мировой практике существуют различные способы повышения степени извлечения золота из дважды упорных концентратов в автоклавном процессе, направленные на разрушение или пассивацию органического углерода, входящего в исходные материалы [19, 20, 25]. К числу перспективных вариантов автоклавного окисления относятся следующие:

Высокотемпературное автоклавное окисление (ВТАО) предусматривает «тотальное» окисление концентратов при 230–250°C в течение 1,5–6,0 ч. При обозначенных условиях обеспечивается окисление не только сульфидов, но и углеродистого вещества, что практически полностью исключает хлоридный и цианидный preg-robbing⁴ [38, 39].

Термическая обработка (ТО) является дополнительной операцией и может применяться как до, так и после автоклавного окисления [40, 41]. Предварительная ТО (до АО) подразумевает термообработку углеродистого сырья при 300–400°C, которая позволяет снизить эффект хлоридного preg-robbing за счет снижения сорбционной активности

⁴Презентация ТЭО проекта АГМК-2. 2019. Режим доступа: <https://www.polymetalinternational.com/ru/investors-and-media/news/press-releases/11-02-2019/> (дата обращения: 18.06.2023).

органического углерода. ТО автоклавного остатка предполагает проведение процесса в окислительной среде и при более высоких температурах 500–550°C. За счет окислительной деструкции большей части органического углерода высвобождается золото, ассоциированное с углеродистым веществом. Основываясь на данных литературных источников, в процессе термической обработки (до 400°C) органический углерод не окисляется, а переходит в менее активную форму, благодаря чему снижается автоклавный preg-robbing. В рамках данного исследования проводилась термообработка исходных концентратов при температуре 350°C.

Применение «вторичного» окислителя в автоклавной технологии заключается в добавке специального реагента-окислителя в автоклав (в дополнение к кислороду) для активации и ускорения процесса окисления углеродистого вещества [42].

В рамках данной работы было проведено лабораторное тестирование дважды упорных золотосульфидных концентратов по вышеописанным технологиям с целью идентификации наиболее универсальной и оптимальной.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Термическая обработка проводилась в трубчатой вращающейся печи при заданной температуре в реакторе и скорости вращения. Навеска материала (примерно 105–110 г) загружалась в реактор печи, включался электродвигатель и нагрев. По достижении температуры 350°C в печи начинался отсчет времени, по истечении 30 мин нагрев выключался. После остывания печи вынимался кварцевый реактор, из которого выгружали материал для дальнейшей подготовки к автоклавному выщелачиванию. ТО проводили без подачи кислорода/воздуха в реактор.

Измельчение исходного концентрата проводили в виде пульпы с дистиллированной водой (Ж:Т = 1:1) в планетарной мельнице Pulverisette 6 «Fritsch» (Германия). Режим измельчения соответствовал умеренному (обозначение – Р3: диаметр шаров – 20 мм; загрузка шаров – 30 шт.; время измельчения – 5 мин, класс крупности -45 мкм – 85–90%) или сверхтонкому измельчению (обозначение – Р8: диаметр шаров – 10 мм; загрузка шаров – 180 шт.; время измельчения – 20 мин, класс крупности -45 мкм – 95–99%).

Пульпу после измельчения подвергали *кислотной обработке* (КО) или декарбонизации для разрушения карбонатов. Репульпацию материала проводили с использованием дистиллированной воды в термостойком стакане с непрерывным перемешиванием пульпы. Отношение Ж:Т = 4:1; температура – 60°C. После достижения рабочей температуры в пульпу подавали концентрированную серную кислоту. Продолжительность операции составляла 30 мин. Пульпу фильтровали на вакуум-фильтре, кек промывали на фильтре дистиллированной водой и переносили в автоклав.

Автоклавное окисление проводили в титановых автоклавах швейцарского производства:

- Premex емкостью 1,2 л;
- Büchi емкостью 1,1 л.

Оба автоклава снабжены электрическими нагревателями, внутренними водоохлаждаемыми змеевиками и контроллерами, позволяющим задавать и автоматически поддерживать температуру процесса (с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$) и скорость вращения перемешивающего устройства. Кислород в автоклав подавали из баллона через заглубленную трубку, используя систему автоматического поддержания давления и непрерывного измерения расхода подаваемого газа с помощью расходомера «Bronkhorst» (Нидерланды).

Автоклавное окисление вели при следующих параметрах: Т от 498 до 523 К (225–250°C) $P_{\text{O}_2} = 5 \cdot 10^5$ Па. В зависимости от режима окисления процесс либо заканчивали при прекращении расхода кислорода, либо продолжали переокисление материала от 30 до 120 мин при тех же температуре и давлении.

Материал подавали в автоклав в виде пульпы, которую готовили с использованием дистиллированной воды. Объем пульпы рассчитывали исходя из коэффициента заполнения автоклава 0,6. Отношение Ж:Т (массовое) получали в результате термохимических расчетов процесса автоклавного окисления с учетом оценки тепловых потерь промышленного автоклава.

По завершении процесса выщелачивания пульпу охлаждали до 95°C, сбрасывали избыточное давление и проводили кондиционирование.

Переокисление с добавкой вторичного окислителя. После того, как сульфиды были полностью окислены (в течение 10–30 мин в зависимости от типа материала), подача

Таблица 1. Характеристика исходных концентратов

Table 1. Characteristics of initial concentrates

Концентрат	Извлечение Au CIL, %	Содержание компонентов, %								Au/S ²⁻	Au/C _{орг}
		Au, г/т	C _{общ}	C _{граф}	C _{орг}	As	Fe	S _{общ}	S _{SO4}	ед.	ед.
K1	40,1	23,5	1,2	0,2	0,8	19,6	27,5	21,8	0,1	1,1	30
K2	63,8	40,9	3,6	0,5	2,9	1,9	19,5	19,4	0,1	2,1	14
K3	63,6	27,4	9,5	4,3	5,0	0,7	20,7	21,3	0,3	1,3	6

Обозначения к табл. 1:

C_{общ} – содержание общего углерода в концентрате;

C_{граф} – содержание углерода в концентрате в виде графита;

C_{орг} – содержание углерода в концентрате в органическом виде;

S_{общ} – содержание общей серы в концентрате;

S_{SO4} – содержание серы в концентрате в виде сульфатов.

кислорода прекращалась. Затем с помощью поршневого насоса «ChromTech» в реактор подавался раствор азотной кислоты. Для получения раствора азотной кислоты использовалась концентрированная азотная кислота (60%), которая смешивалась с дистиллированной водой в объемном соотношении 1:1. После подачи кислородная линия снова открывалась, а также открывалась линия сброса абгаза из автоклава. С этого момента начинался процесс переокисления материала.

Автоклавную пульпу подвергали кондиционированию при перемешивании и температуре 95°C в течение 120 мин с целью растворения основного сульфата железа и арсената железа. По окончании кондиционирования пульпу фильтровали на вакуум-фильтре, кек промывали на фильтре дистиллированной водой и направляли на цианирование. Пробу раствора и кека направляли на химический анализ.

Цианирование проводили в стеклянном реакторе при комнатной температуре и механическом перемешивании пульпы в течение 24 ч. Содержание твердого составляло 20% (Ж:Т = 4:1), рН пульпы 10,5–11,0, концентрация цианида в жидкой фазе пульпы в ходе опыта поддерживалась равной 2 г/дм³. В качестве базового сорбента использовалась смола Purogold S992, при необходимости применяли смолу AMBERSEP 91419 (MINIX) и активированный уголь NauCarb RPMC1004. Концентрация сорбента в пульпе составляла 5% (об.) от объема жидкой фазы (если не указано другое). По завершении цианирования сорбент отделяли на сите с размером ячейки 0,4 мм. Пульпу фильтровали, твердый остаток промывали, сушили и отправляли на пробирный и химический анализ.

На каждом концентрате были проведены следующие опыты:

Базовый опыт проводился в стандартных режимах АОВ: Т от 498 К (225°C) P_{O2} = 5·10⁵ Па. Подготовка материала включала измельчение и кислотную обработку. После АО пульпа подвергалась кондиционированию, кек АО далее цианировали.

Опыт с предварительной термообработкой исходного концентрата проводился по методике, описанной выше. После ТО материал подвергался АО по указанной выше методике.

Опыты по ВТАО проводили при увеличенном времени пребывания материала в автоклаве (время переокисления). Температуру увеличивали до 523 К (250°C), время переокисления от 30 до 120 мин.

Опыты с добавкой азотной кислоты в качестве вторичного окислителя проводили при расходе азотной кислоты 100 кг/т исходного концентрата и увеличенным временем окисления (переокисления) 30 мин.

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

При проведении исследований были использованы 3 различных концентрата, химический состав которых представлен в табл. 1.

Представленные концентраты отличаются по многим характеристикам: количество цианируемого золота, содержание органического углерода, мышьяка, золота, а также таких показателей, как Au/S²⁻ и Au/C_{орг}. Технологические трудности с извлечением золота из концентратов двойной упорности существенно зависят от содержания органического углерода в перерабатываемом сырье.

Показатель Au/S²⁻ характеризует концентраты по «привлекательности» при их переработке за счет потенциальной прибыли от золота к расходам (кислород на окисление серы, нейтрализация серноокислых

растворов и т.д.). Соответственно, чем меньше показатель, тем выше себестоимость полученного золота. В промышленной практике переработки золотосодержащих руд и концентратов по автоклавной технологии отношение Au/S^{2-} , как правило, составляет 1,5 ед. и выше. Таким образом, концентраты с показателем $Au/S^{2-} < 1,5$ ед. можно охарактеризовать как низкоккачественные. При этом имеются и примеры проектов (Твин-Крикс, Лихир и Пуэбло-Вьехо), которые работают на сырье с отношением Au/S^{2-} 0,4–0,7 ед. [43].

Высокоуглеродистые концентраты, как правило, имеют высокий показатель Au/S^{2-} , однако для этих групп концентратов также характерны низкие отношения $Au/C_{орг}$. Последний показатель позволяет отнести концентраты к категории сырья с высоковыраженной вторичной (углеродистой) упорностью к извлечению золота, которая связана с

феноменом preg-robbing драгметалла углеродистым веществом.

Проба концентрата К1 характеризуется средними содержаниями серы – 21,6% и содержанием золота – 23,5 г/т. Содержание органического углерода среднее – 1,03%.

Концентрат К2 отличается высоким содержанием органического углерода – 3,4%, средним содержанием серы – 19,3% и высоким содержанием золота – 41 г/т.

Концентрат К3 отличается очень высоким содержанием органического углерода – 9,45%, средним содержанием серы – 21,0% и средним содержанием золота – 27 г/т.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные параметры и результаты экспериментов представлены в табл. 2.

Прямое сорбционное цианирование кон-

Таблица 2. Основные параметры и результаты экспериментов

Table 2. Main parameters and experimental results

Концентрат	ТО	АО	Добавка HNO_3 , кг/т	Т ок-е, мин	т переок-е, мин	У кек АО, %	Е Au, %	С Au ХЦ, г/т	С кек, %	ΔС, %
К1	-	498 К/5·10 ⁵ Па	0	26	0	74	80,0	5,9	1,2	14,3
	+	498 К/5·10 ⁵ Па	0	27	0	80	88,2	3,4	1,1	18,4
	-	523 К/5·10 ⁵ Па	0	11	30	85	98,0	0,6	0,5	36,8
	-	498К/5·10 ⁵ Па	100	25	30	76	98,0	0,6	0,2	86,0
К2	-	498 К/5·10 ⁵ Па	0	17	0	63	85,2	9,5	4,8	9,6
	+	498 К/5·10 ⁵ Па	0	16	0	61	81,2	12,6	5,2	4,6
	-	523 К/5·10 ⁵ Па	0	8	30	69	91,3	5,1	3,3	32,3
	-	523 К/5·10 ⁵ Па	0	7	60	67	96,0	2,4	1,3	39,1
	-	523 К/5·10 ⁵ Па	0	8	120	73	97,5	1,4	1,9	58,9
	-	498 К/5·10 ⁵ Па	100	17	30	63	98,6	0,9	0,5	84,6
К3	-	498 К/5·10 ⁵ Па	0	18	0	68	66,0	14,7	14,5	5,4
	+	498 К/5·10 ⁵ Па	0	16	0	60	70,5	13,3	14,3	7,9
	-	523 К/5·10 ⁵ Па	0	9	30	64	72,4	12,9	12,4	12,8
	-	498 К/5·10 ⁵ Па	100	18	30	68	72,8	9,7	5,4	61,3
	-	498 К /5·10 ⁵ Па	150	16	30	67	83,5	5,6	3,4	75,5

Обозначения в табл. 2:

ТО – термообработка (30 мин обработки при температуре 350°С);

АО – автоклавное окисление (температура/парциальное давление кислорода);

Добавка HNO_3 – добавка азотной кислоты в качестве вторичного окислителя, в кг кислоты на тонну исходного концентрата;

т ок-е, мин – продолжительность автоклавного окисления в минутах;

т переок-е, мин – продолжительность перекисления материала в минутах;

У кек АО, % – массовый выход автоклавного кекка;

Е Au, % – степень извлечения золота;

С Au ХЦ, г/т – содержание золота в хвостах цианирования;

С кек, % – концентрация органического углерода в кекке АО;

Δ С, % – степень окисления (удаления) органического углерода после АО.

концентрата К1 показывает, что доля свободно цианируемого золота в исходном концентрате составляет 40% (см. рис. 1). Проведение автоклавного окисления позволяет поднять извлечение золота до 80%, но имеет место preg-robbing. Проведение предварительной термической обработки положительно сказывается на показателях извлечения золота, оно возрастает до 88%, при этом степень окисления органического углерода возрастает незначительно с 14 до 18%.

Повышение температуры АО с дополнительным переокислением также оказало положительный эффект, извлечение поднялось до 98%, содержание золота в хвостах цианирования сократилось в 10 раз, степень окисления органического углерода возросла до 36%.

Добавка азотной кислоты в качестве вторичного окислителя также эффективна. Извлечение золота увеличивается до 98%, при этом степень окисления органического углерода возрастает до 86%, что говорит о высоких окислительных свойствах азотной кислоты.

Примечательно, что для данного материала достаточно удалить 36% органического углерода, дальнейшее его окисление нецелесообразно. Вполне вероятно, что расход в 100 кг/т азотной кислоты для данного материала избыточен и может быть снижен.

Концентрат К2 содержит 64% свободно цианируемого золота. Извлечение золота после автоклавного окисления составляет 85%.

Предварительная термическая обработка данного материала оказывает негативный эффект, снижая извлечение до 81%. Можно предположить, что в процессе ТО поверхность углеродистого вещества, наоборот, активировалась, создав большее количество сорбирующих пор. После этого в процессе цианирования наблюдался негативный эффект снижения извлечения золота за счет цианидного preg-robbing.

Применение технологии высокотемпературного автоклавного окисления позволяет повысить извлечение золота, однако для значительного прироста до 97% необходимо 120 мин переокисления материала в автоклаве. В реальном производстве такой режим окисления потребует значительного снижения производительности автоклава, что в итоге скажется на экономике предприятия.

Технология с добавкой азотной кислоты для данного материала является оптимальной, поскольку она позволяет резко повысить извлечение золота до 98% при 30-минутном переокислении, степень окисления углерода достигает 85%.

Концентрат К3 содержит 64% свободно цианируемого золота. Автоклавное окисление практически не увеличивает извлечение золота и составляет лишь 66%. Это может говорить о сильном влиянии процесса preg-robbing в автоклаве и сорбции золота на природное углеродистое вещество. ТО положительно сказывается на извлечении золота, увеличивая

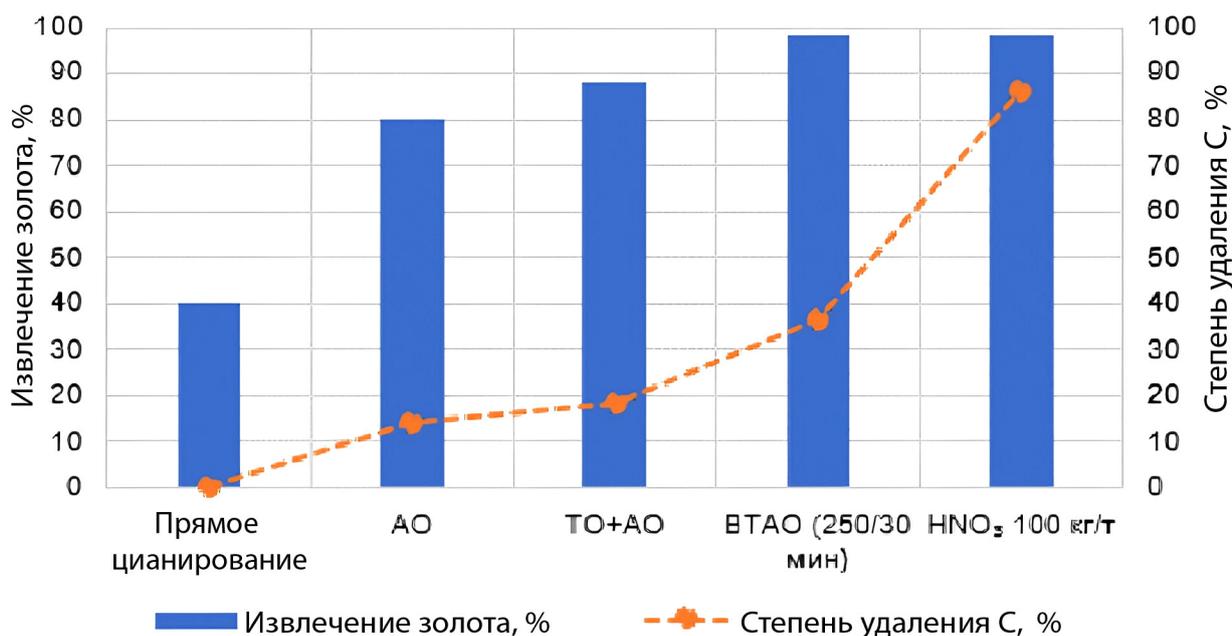


Рис. 1. Результаты экспериментов на концентрате К1
Fig. 1. Results of concentrate K1 experiments

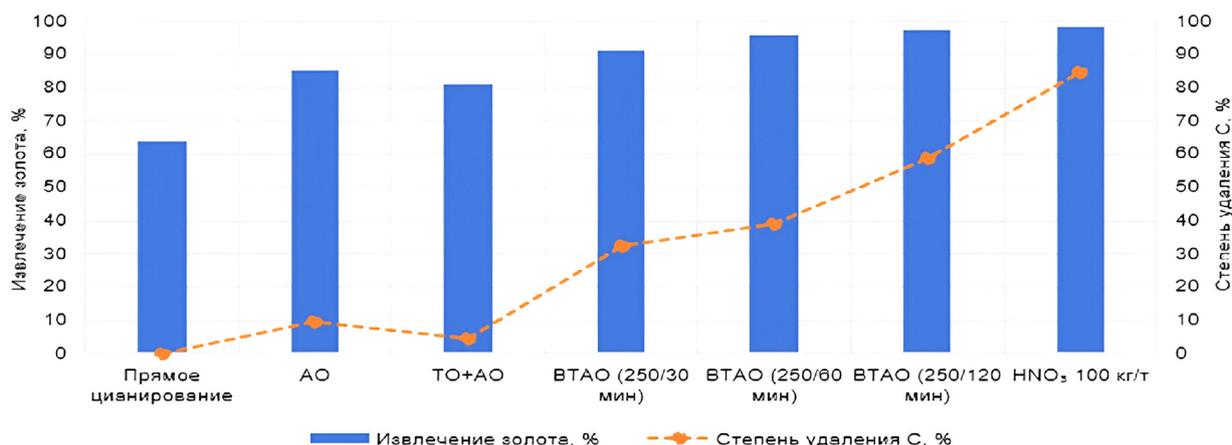


Рис. 2. Результаты экспериментов на концентрате K2
Fig. 2 Results of concentrate K2 experiments

его до 70%, при этом углерод практически не удаляется, степень его окисления возрастает с 5 до 7%.

ВТАО и добавка азотной кислоты оказывают одинаковый эффект, увеличивая извлечение золота до 72%. При этом степень удаления углерода в опыте с добавкой азотной кислоты заметно выше (61% против 13%). Скорее всего, углерод в данном концентрате представлен большим количеством форм, которые в процессе ТО и ВТАО

легко поддаются процессу дезактивации и на последующем АО и цианировании не сорбируют комплексы золота.

Также на данном материале был проведен дополнительный опыт с увеличенным расходом азотной кислоты, в результате которого извлечение золота удалось повысить до 83%. Вполне вероятно, что повышенный расход азотной кислоты окажет более значительный эффект. Такой же вывод можно сделать с увеличением времени перекисления для ВТАО.

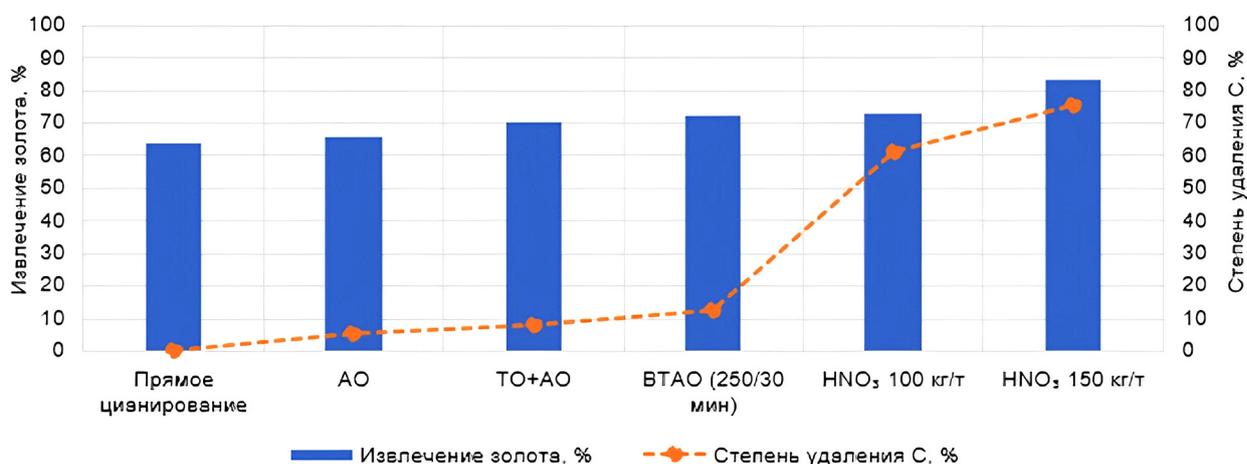


Рис. 3. Результаты экспериментов на концентрате K3
Fig. 3. Results of concentrate K3 experiments

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного тестирования различных технологий повышения степени извлечения золота в автоклавной технологии из дважды упорных золотосодержащих концентратов можно сделать следующие выводы:

Предварительная термическая обработка концентратов, поступающих на АО, показывает положительный эффект. К преимуществам

технологии можно отнести низкие капитальные затраты на организацию предварительной ТО, отсутствие выбросов соединений серы и мышьяка в процессе ТО (температура обработки ниже температуры диссоциации сульфидов) и возможность переработки мало- и среднеуглеродистых концентратов.

К недостаткам технологии относятся сравнительно невысокое повышение извлечения

золота, высокие операционные затраты, а также ее неуниверсальность, поскольку, как показали опыты, положительный эффект наблюдался не на всех материалах.

В целом термическую обработку можно рассматривать как дополнительный передел совместно с другой технологией из рассмотренных в данной работе, но не в качестве самостоятельного технологического решения.

Высокотемпературное автоклавное окисление концентратов с различным содержанием углерода позволяет обеспечить высокое извлечение золота для высокоуглеродистых концентратов.

По сравнению с традиционным, высокотемпературный метод автоклавного окисления потребует значительного увеличения объема и повышения прочностных характеристик автоклавной аппаратуры.

Использование вторичного окислителя (в виде азотной кислоты) при расходе 100 кг/т и продолжительности переокисления 30 мин на стадии автоклавного окисления повы-

сило извлечение золота, которое составило 97%. Однако для высокоуглеродистых концентратов с содержанием углерода более 9% необходим повышенный (более 150 кг/т) расход азотной кислоты.

Основной положительный эффект достигается за счет окисления сорбционно-активной части углеродистого вещества, что приводит к высвобождению золота и снижению способности угля к автоклавному preg-robbing.

К основным недостаткам технологии относятся следующие: высокая стоимость реагента (азотной кислоты), увеличение экологической нагрузки из-за применения реагента, возможное коррозионное влияние на конструкционные материалы, а также отсутствие промышленного опыта использования технологии в аналогичных условиях. Однако чрезвычайно высокая эффективность технологии применительно к концентратам с различным содержанием углеродистого вещества позволяет рекомендовать ее для проведения дальнейших исследований.

Список источников

1. Захаров Б.А., Меретуков М.А. Золото: упорные руды. М.: Руда и металлы, 2013. 452 с.
2. Васильева А.А., Бодуэн А.Я. Минералогические особенности и способы переработки медных цинксодержащих концентратов (Учалинский горно-обогатительный комбинат) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 3. С. 61–72. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/3/3956>.
3. Васильева А.А., Бодуэн А.Я., Васильев Р.Е. Анализ возможности применения гидрометаллургических методов с целью улучшения переработки медных концентратов // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 320–335. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-320-335>.
4. Бодуэн А.Я., Поперечникова О.Ю., Залесов М.В., Григорьева В.А. Экспериментальное опробование технологий переработки упорного золотосодержащего сырья // Цветные металлы. 2022. № 7. С. 24–33. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.07.02>.
5. Меретуков М.А., Рудаков В.В., Злобин М.Н. Геотехнологические исследования для извлечения золота из минерального и техногенного сырья. М.: Горная книга, 2011. 438 р.
6. Федотов П.К., Сенченко А.Е., Федотов К.В., Бурдонов А.Е. Исследования обогатимости сульфидных и окисленных руд золоторудных месторождений Алданского щита // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 218. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.2.218>.
7. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. Extraction of low-dimensional structures of noble and rare metals from carbonaceous ores using low-temperature and energy impacts at succeeding stages of raw material transformation // Minerals. 2023. Vol. 13. Iss. 1. P. 84. <https://doi.org/10.3390/min13010084>.
8. Chryssoulis S.L., McMullen J. Mineralogical investigation of gold ores // Developments in Mineral Processing. 2005. Vol. 15. P. 21–72. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15002-9](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15002-9).
9. Артемьев Д.С., Крымский Р.Ш., Беяцкий Б.В., Ашихмин Д.С. Возраст оруденения Майского золоторудного месторождения (Центральная Чукотка): результаты Re-Os изотопного датирования. Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 266–278. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.3.266>.
10. Marsden J.O., House C.I. The chemistry of gold extraction // Pyrometallurgical Oxidation. Littleton, Colorado: SME, 2006. Vol. 39. Iss. 3. P. 138. <https://doi.org/10.1007/BF03215543>.
11. Матвеев А.И., Лебедев И.Ф., Винокуров В.Р., Львов Е.С. Научно-экспериментальные основы сухого обогащения руд полезных ископаемых // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 613–622. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.90>.
12. Жмурова В.В., Немчинова Н.В. Опыт комплексного использования золотосодержащего сырья при производстве драгоценных металлов // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 506–511. <https://doi.org/10.31897/pmi.2018.5.506>.

13. Afenya P.M. Treatment of carbonaceous refractory gold ores // *Minerals Engineering*. 1991. Vol. 4. Iss. 7-11. P. 1043–1055. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90082-7](https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90082-7).
14. Miller J.D., Wan R.-Y., Díaz X. Preg-robbing gold ores // *Gold Ore Processing: Project Development and Operations* / ed. M.D. Adams. Singapore: Ltd, 2016. Chapt. 49. P. 885–907. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00049-9>.
15. Воробьев-Десятковский Н.В., Епифанов А.В. Автоклавное окисление дважды упорных золотосодержащих руд. Проблемы и пути решения // *Минерально-сырьевой комплекс России – новые рубежи и вызовы: 10 Горнопромышленный форум*. 2014. Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/2335298/avtoklavnoe-okislenie-dvazhdy-upornyh-zolotosoderzhashih-rud?ysclid=lpog3go4l424674494> (дата обращения: 15.06.2023).
16. Selley R.C., Sonnenberg S.A. Elements of petroleum geology // *Elements of Petroleum Geology*. 2023. 622 p. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-04461-5>.
17. Selley R.C. Sedimentary rocks: mineralogy and classification // *Encyclopedia of Geology*. 2004. P. 25–37. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369396-9/00304-X>.
18. Van Vuuren C.P.J., Snyman C.P., Boshoff A.J. Gold losses from cyanide solutions part II: the influence of the carbonaceous materials present in the shale material // *Minerals Engineering*. 2000. Vol. 13. Iss. 10-11. P. 1177–1181. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00100-X](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00100-X).
19. Гордеев Д.В., Петров Г.В., Хасанов А.В., Северинова О.В. Обзор современных технологий переработки упорных золотосодержащих руд и концентратов с применением азотной кислоты // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022. Т. 333. № 1. С. 214–224. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/1/3228>.
20. Naboichenko S.S., Shneerson Ya.M., Kalashnikova M.I., Chugaev L.V. Autoclave hydrometallurgy of non-ferrous metals. Yekaterinburg: GOU VPO USTU-UPI, 2009. Vol. 2. 939 p.
21. Aleksandrova T.N., Heide G., Afanasova A.V. Assessment of refractory gold-bearing ores based of interpretation of thermal analysis data // *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 235. Iss. 1. P. 30–37. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.1.30>.
22. Ракишев К. «Золото» за упорство // *Интерфакс*. 2018. Режим доступа: <https://www.interfax.ru/business/643474> (дата обращения: 15.06.2023).
23. Zalesov M.V., Grigoreva V.A., Trubilov V.S., Boduen A.Ya. Designing of engineering solutions to enhance efficiency of high-copper gold-bearing ore processing // *Горная промышленность*. 2021. № 5. С. 51–56. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-5-51-56>.
24. Simmons G.L., Baughman D.R., Gathje J.C., Oberg K.C. Pressure oxidation problems and solutions: treating carbonaceous gold ores containing trace amounts of chlorine (halogens) // *Mining Engineering*. 1998. Vol. 50. Iss. 1. P. 69–73.
25. Шнеерсон Я.М., Чугаев Л.В. Особенности автоклавного окисления сульфидных золотосодержащих концентратов двойной упорности // *Цветные металлы*. 2019. № 8. С. 55–66. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.06>.
26. Zaytsev P., Fomenko I., Shneerson Ya., Polezhaev S., Pleshkov M. Special aspects of continuous pressure oxidation of double refractory concentrates // *Conference: ALTA*. 2014. P. 226–234.
27. Helm M., Vaughan J., Staunton, W.P., Avraamides J. An investigation of the carbonaceous component of preg-robbing gold ores // *World Gold Conference. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2009.
28. Edahbi M., Mermillod-Blondin R., Plante B., Benzaazoua M. CIL gold loss characterization within oxidized leach tails: creating a synergistic approach between mineralogical characterization, diagnostic leach tests, and preg-robbing tests // *Minerals*. 2019. Vol. 9. Iss. 9. P. 557. <https://doi.org/10.3390/min9090557>.
29. Simmons G.L. Pressure oxidation process development for treating carbonaceous ores at Twin Creeks // *Randol Gold Forum. Golden*, 1996. P. 199–208.
30. Chan T., Collins M., Dennett J., Stiksmas J., Ji J., Kalanchey R., Berezowsky R. Pilot plant pressure oxidation of refractory gold-silver concentrate from Eldorado Gold Corporation's Certaj Project in Romania // *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2015. Vol. 54. Iss. 3. P. 252–260. <https://doi.org/10.1179/1879139515Y.0000000018>.
31. Aleksandrova T.N., Heide G., Afanasova A.V. Assessment of refractory gold-bearing ores based of interpretation of thermal analysis data // *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 235. Iss. 1. P. 30–37. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.1.30>.
32. Rusalev R.E., Rogozhnikov D.A., Naboichenko S.S. Nitric acid treatment of Olympiada deposit refractory gold-bearing concentrate // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 946. P. 541–546. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.541>. EDN: HARCAW.
33. Anderson C.G. Applications of NSC pressure leaching // *Pressure Hydrometallurgy. Montreal: The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum*, 2004. P. 855–886.
34. Ackerman J.B., Anderson C.G., Nordwick S.M., Krys L.E. Hydrometallurgy at the Sunshine metallurgical complex // *Proceedings of the Fourth International Symposium on Hydrometallurgy. Litleton, Colorado, SME*, 1993.
35. Anderson C.G. The application and economics of industrial NSC pressure leaching to copper ores and concentrates. COBRE 2003. Santiago, 2003.
36. Anderson C.G. Nitrogen species catalyzed pressure leaching of copper ores and concentrates // *ALTA Copper 2000. Adelaide*, 2000.
37. Anderson C.G., Rosenberg E. Single step separation and recovery of palladium using nitrogen species catalyzed pressure leaching and silica polyamine composites // *Hydrometallurgy: Conference. Vancouver*, 2003.
38. Фоменко И.В., Плешков М.А., Лях С.И., Лаевский С.И. Высокотемпературное автоклавное окисление сырья двой-

ной упорности // Цветные металлы. 2020. № 9. С. 110–116. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.09.11>.

39. Лаевский С.И., Лях С.И., Маркелов А.В. Высокотемпературное автоклавное окисление золотосодержащего сырья двойной упорности // Металлургия цветных, редких и благородных металлов: сб. тез. докл. XIV Международной конф., посвящ. 40-летию Института химии и химической технологии Сибирского отделения РАН (г. Красноярск, 6–9 сентября 2021 г.). Красноярск: Научно-инновационный центр, 2021. С. 54–56. EDN: RTKBTE.

40. Полежаев С.Ю., Черемисина О.В. Комплексная технология переработки золотосодержащих концентратов: автоклавное выщелачивание с последующим обжигом // Известия вузов. Цветная металлургия. 2015. № 3. С. 34–39. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2015-3-34-39>.

41. Пат. № 2636775, Российская Федерация, С2. С22В 11/00, С22В 3/06. Способ переработки золотосодержащих концентратов двойной упорности / Л.В. Чугаев, Я.М. Шнеерсон, М.А. Плешков, И.В. Фоменко, А.В. Маркелов. Заявл. 20.02.2016; опубл. 28.11.2017.

42. Пат. № 2732819, Российская Федерация, С1, С22В 11/00, С22В 3/00. Способ автоклавной переработки углистых золотосодержащих концентратов с использованием дополнительного реагента-окислителя / Д.В. Гордеев, И.В. Фоменко, Л.В. Чугаев, Я.М. Шнеерсон; Заявл. 01.11.2019; опубл. 22.09.2020.

43. Набойченко С.С., Шнеерсон Я.М., Калашникова М.И., Чугаев Л.В. Автоклавная гидрометаллургия цветных металлов. 2009. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2009. Т. 2. 939 с.

References

1. Zakharov B.A., Meretukov M.A. *Gold: refractory ores*. Moscow: Ruda i metally; 2013, 452 p. (In Russ.).
2. Vasileva A.A., Boduen A.Ya. Mineralogical features and processing of copper zinc-containing concentrates (Uchalinsky Mining and Processing Plant). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023;334(3):61-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/3/3956>.
3. Vasilieva A.A., Boduen A.Ya., Vasiliev R.E. The feasibility of hydrometallurgical methods for enhancing the processing of copper concentrates. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):320-335. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-320-335>.
4. Boduen A.Ya., Poperechnikova O.Yu., Zalesov M.V., Grigoryeva V. Experimental testing of technologies for processing refractory gold-bearing raw materials. *Tsvetnye Metally*. 2022;7:24-33. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.07.02>.
5. Meretukov M.A., Rudakov V.V., Zlobin M.N. *Geotechnological research for gold extraction and recovery from mineral and technogenic raw materials*. Moscow: Gornaya kniga; 2011, 438 p. (In Russ.).
6. Fedotov P.K., Senchenko A.E., Fedotov K.V., Burdonov A.E. Studies of enrichment of sulfide and oxidized ores of gold deposits of the Aldan shield. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2020;242:218. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.2.218>.
7. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. Extraction of low-dimensional structures of noble and rare metals from carbonaceous ores using low-temperature and energy impacts at succeeding stages of raw material transformation. *Minerals*. 2023;13(1):84. <https://doi.org/10.3390/min13010084>.
8. Chryssoulis S.L., McMullen J. Mineralogical investigation of gold ores. In: *Developments in Mineral Processing*. 2005;15: 21-72. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15002-9](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15002-9).
9. Artemiev D.S., Krymsky R.S., Belyatsky B.V., Ashikhmin D.S. Mineralization age of Mayskoe gold ore deposit (Central Chukotka): Re-Os isotopic dating results. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2020;266-278. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.3.266>.
10. Marsden J.O., House C.I. The chemistry of gold extraction. In: *Pyrometallurgical Oxidation*. Littleton, Colorado: SME; 2006, vol. 39, iss. 3, p. 138. <https://doi.org/10.1007/BF03215543>.
11. Matveev A.I., Lebedev I.F., Vinokurov V.R., L'vov E.S. Scientific and experimental foundations of mineral ore dry beneficiation. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2022;256:613-622. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2022.90>.
12. Zhmurova V.V., Nemchinova N.V. Experience of integrated use of gold-bearing raw material in the production of precious metals. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2018;233:506. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2018.5.506>.
13. Afenya P.M. Treatment of carbonaceous refractory gold ores. *Minerals Engineering*. 1991;4(7-11):1043-1055. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90082-7](https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90082-7).
14. Miller J.D., Wan R.-Y., Díaz X. Preg-robbing gold ores. In: Adams M.D. (ed.). *Gold Ore Processing: Project Development and Operations*. Singapore: Ltd; 2016, chapt. 49, p. 885-907. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00049-9>.
15. Vorobiev-Desyatovskij N.V., Epifanov A.V. Pressure oxidation of double refractory gold ores. Problems and solutions. *Mineral'no-syr'evoy kompleks Rossii – novye rubezhi i vyzovy: 10 Gornopromyshlennyj forum*. 2014. Available from: <https://studylib.ru/doc/2335298/avtoklavnoe-okislenie-dvazhdy-upornyh-zolotosoderzhashhih-rud?ysclid=lopog-3go4l424674494> [Accessed 15th June 2023]. (In Russ.).
16. Selley R.C., Sonnenberg S.A. Elements of petroleum geology. In: *Elements of Petroleum Geology*. 2023, 622 p. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-04461-5>.

17. Selley R.C. Sedimentary rocks: mineralogy and classification. In: *Encyclopedia of Geology*. 2004;25-37. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369396-9/00304-X>.
18. Van Vuuren C.P.J., Snyman C.P., Boshoff A.J. Gold losses from cyanide solutions part II: the influence of the carbonaceous materials present in the shale material. *Minerals Engineering*. 2000;13(10-11):1177-1181. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00100-X](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00100-X).
19. Gordeev D.V., Petrov G.V., Hasanov A.V., Severinova O.V. Review of modern processing technologies of refractory gold ores and concentrates using nitric acid. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov = Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(1):214-224. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/1/3228>.
20. Naboychenko S.S., Shneerson Ya.M., Kalashnikova M.I., Chugaev L.V. *Autoclave hydrometallurgy of non-ferrous metals*. Yekaterinburg: GOU VPO USTU-UPI; 2009, vol. 2, 939 p.
21. Aleksandrova T.N., Heide G., Afanasova A.V. Assessment of refractory gold-bearing ores based of interpretation of thermal analysis data. *Journal of Mining Institute*. 2019;235(1):30-37. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.1.30>.
22. Rakishev K. "Gold" for being refractory. *Interfaks*. 2018. Available from: <https://www.interfax.ru/business/643474> [Accessed 15th June 2023]. (In Russ.).
23. Zalesov M.V., Grigoreva V.A., Trubilov V.S., Boduen A.Ya. Designing of engineering solutions to enhance efficiency of high-copper gold-bearing ore processing. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(5):51-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-5-51-56>.
24. Simmons G.L., Baughman D.R., Gathje J.C., Oberg K.C. Pressure oxidation problems and solutions: treating carbonaceous gold ores containing trace amounts of chlorine (halogens). *Mining Engineering*. 1998;50(1):69-73.
25. Shneerson Y.M., Chugaev L.V. Pressure oxidation of double refractory gold bearing sulphide concentrates. *Tsvetnye Metally*. 2019;8:55-66. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.06>.
26. Zaytsev P., Fomenko I., Shneerson Ya., Polezhaev S., Pleshkov M. Special aspects of continuous pressure oxidation of double refractory concentrates. In: *Conference: ALTA*. 2014;226-234.
27. Helm M., Vaughan J., Staunton, W.P., Avraamides J. An investigation of the carbonaceous component of preg-robbing gold ores. *World Gold Conference. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2009.
28. Edahbi M., Mermillod-Blondin R., Plante B., Benzaazoua M. CIL gold loss characterization within oxidized leach tails: creating a synergistic approach between mineralogical characterization, diagnostic leach tests, and preg-robbing tests. *Minerals*. 2019;9(9):557. <https://doi.org/10.3390/min9090557>.
29. Simmons G.L. Pressure oxidation process development for treating carbonaceous ores at Twin Creeks. In: *Randol Gold Forum*. Golden, 1996;199-208.
30. Chan T., Collins M., Dennett J., Stikma J., Ji J., Kalanchey R., Berezowsky R. Pilot plant pressure oxidation of refractory gold-silver concentrate from Eldorado Gold Corporation's Certej Project in Romania. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2015;54(3):252-260. <https://doi.org/10.1179/1879139515Y.0000000018>.
31. Aleksandrova T.N., Heide G., Afanasova A.V. Assessment of refractory gold-bearing ores based of interpretation of thermal analysis data. *Journal of Mining Institute*. 2019;235(1):30-37. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.1.30>.
32. Rusalev R.E., Rogozhnikov D.A., Naboychenko S.S. Nitric acid treatment of Olympiada deposit refractory gold-bearing concentrate. *Materials Science Forum*. 2019;946:541-546. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.541>. EDN: HARCAW.
33. Anderson C.G. Applications of NSC pressure leaching. In: *Pressure Hydrometallurgy*. Montreal: The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum; 2004, p. 855-886.
34. Ackerman J.B., Anderson C.G., Nordwick S.M., Kryz L.E. Hydrometallurgy at the Sunshine metallurgical complex. In: *Proceedings of the Fourth International Symposium on Hydrometallurgy*. Littleton, Colorado, SME, 1993.
35. Anderson C.G. The application and economics of industrial NSC pressure leaching to copper ores and concentrates. In: *COBRE 2003*. Santiago; 2003.
36. Anderson C.G. Nitrogen species catalyzed pressure leaching of copper ores and concentrates. In: *ALTA Copper 2000*. Adelaide, 2000.
37. Anderson C.G., Rosenberg E. Single step separation and recovery of palladium using nitrogen species catalyzed pressure leaching and silica polyamine composites. In: *Hydrometallurgy: Conference*. Vancouver; 2003.
38. Fomenko I.V., Pleshkov M.A., Lyakh S.I., Laevskiy S.I. High-temperature pressure oxidation of double-refractory raw materials. *Tsvetnye Metally*. 2020;9:110-116. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.09.11>.
39. Laevskiy S.I., Lyakh S.I., Markelov A.V. High temperature pressure oxidation of double refractory gold materials. In: *Metallurgiya cvetnyh, redkih i blagorodnyh metallov: sbornik tezisov dokladov XIV mezhdunarodnoj konferencii, posvyashchenoj 40-letiyu Instituta himii i himicheskoy tekhnologii Sibirskogo otdeleniya RAN = Metallurgy of non-ferrous, rare and noble metals: collected abstracts of the reports of the 14th International Conference dedicated to the 40th anniversary of the Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*. 6–9 September 2021, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Nauchno-innovacionnyj centr; 2021, p. 54-56. (In Russ.). EDN: RTKBTE.
40. Polezhaev S.Yu., Cheremisina O.V. Complex processing technology of gold-containing concentrates: autoclave leaching with subsequent roasting. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2015;(3):34-39.

(In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2015-3-34-39>.

41. Chugaev L.V., Shneerson Ya.M., Pleshkov M.A., Fomenko I.V., Markelov A.V. *Processing method for double refractory gold-containing concentrates*. Patent RF, no. 2636775; 2017. (In Russ.).

42. Gordeev D.V., Fomenko I.V., Chugaev L.V., Shneerson Ya.M. *Method of pressure processing of carbonaceous gold-containing concentrates using an additional oxidizing agent*. Patent RF, no. 2732819, 2020. (In Russ.).

43. Naboichenko S.S., Shneerson Ya.M., Kalashnikova M.I., Chugaev L.V. *Pressure hydrometallurgy of non-ferrous metals*. Ekaterinburg: Ukhta State Technical University; 2009, vol. 2, 939 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Георгий Валентинович,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия
✉ petroffg@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2382-5235>

Гордеев Даниил Валерьевич,

аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия
danya.gordeev.2014@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1381-7808>

Бекирова Вероника Руслановна,

магистрант,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия
lalalen00@inbox.ru
<https://orcid.org/0009-0006-8938-1744>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 02.10.2023 г.;
одобрена после рецензирования 30.10.2023 г.;
принята к публикации 06.11.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Georgii V. Petrov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Metallurgy Department,
Saint Petersburg Mining University named
after the Empress Catherine II,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia
✉ petroffg@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2382-5235>

Daniil V. Gordeev,

Postgraduate Student,
Saint Petersburg Mining University named
after the Empress Catherine II,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia
danya.gordeev.2014@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1381-7808>

Veronika R. Bekirova,

Master's Degree Student,
Saint Petersburg Mining University named
after the Empress Catherine II,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia
lalalen00@inbox.ru
<https://orcid.org/0009-0006-8938-1744>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 02.10.2023;
approved after reviewing 30.10.2023;
accepted for publication 06.11.2023.



Научная статья

УДК 669.21:669.822:66.081

EDN: KDVAMS

DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-821-828

Кучное сернокислотно-тиоцианатное выщелачивание золота и урана

А.А. Шипнигов^{1✉}, А.В. Епифоров², Р.М. Собенников³,
Е.Д. Мусин⁴, С.В. Баликов⁵

¹⁻⁵Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов,
г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель – определить основные показатели совместного (одновременного) кучного выщелачивания золота и урана из окисленной золотоурановой руды сернокислыми тиоцианатными растворами. Пилотные испытания по совместному кучному выщелачиванию золота и урана проводили на окисленной золотоурановой руде, дробленной до крупности -40+0 мм. Содержание золота в руде составило 0,80 г/т, урана – 266 г/т. Для исследований использовалась перколяционная колонна диаметром 300 и высотой 2000 мм. Масса руды в колонне составляла 180 кг. Температура в процессе испытаний находилась в пределах 17–25°C. Выщелачивание проводили при следующих условиях: концентрация H₂SO₄ – 5 г/дм³, концентрация SCN⁻ – 0,5 г/дм³, Eh – 490–510 мВ, концентрация ионов Fe³⁺ – 1,0–1,5 г/дм³. Источником ионов железа служили кислоторастворимые минералы, содержащиеся в руде. В качестве окислителя ионов Fe²⁺ использовалась пероксид водорода. Пилотные испытания выполнялись в замкнутом цикле с отдельной сорбцией золота и урана. По результатам проведенных исследований по сернокислому тиоцианатному кучному выщелачиванию извлечение золота составило 90%, урана – 55%. Конечным продуктом выщелачивания золота и урана являлись насыщенные активированные угли и ионообменные смолы. Установлено, что содержание золота на активированных углях составило 0,5–0,6 мг/г, а содержание урана на ионообменных смолах – 30–35 мг/г. Расход реагентов составил: H₂SO₄ – 10,5 кг/т, KSCN – 0,94 кг/т, H₂O₂ – 0,65 кг/т. Показано, что технология совместного кучного выщелачивания золота и урана сернокислыми тиоцианатными растворами позволяет эффективно перерабатывать исследуемую руду. Показатели извлечения золота и урана сопоставимы с показателями, полученными в ходе пилотных испытаний по кучному выщелачиванию исследуемой руды по стандартной технологии отдельного извлечения данных металлов с использованием сернокислых и цианидных растворов в две стадии.

Ключевые слова: кучное выщелачивание, окисленная руда, сернокислотное выщелачивание, тиоцианат, золото, уран

Для цитирования: Шипнигов А.А., Епифоров А.В., Собенников Р.М., Мусин Е.Д., Баликов С.В. Кучное сернокислотно-тиоцианатное выщелачивание золота и урана // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 821–828. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-821-828>. EDN: KDVAMS.

METALLURGY

Original article

Heap sulphuric-thiocyanate leaching of gold and uranium

Anton A. Shipnigov^{1✉}, Alexander V. Epiforov², Roman M. Sobennikov³,
Evgeniy D. Musin⁴, Stanislav V. Balikov⁵

¹⁻⁵Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

Abstract. The article evaluates the main parameters of simultaneous heap leaching of gold and uranium from oxidised gold-uranium ore using sulphuric acid thiocyanate solutions. Pilot tests for the simultaneous heap leaching of gold and uranium were carried out using oxidised crushed gold-uranium ore with a size of -40+0 mm. The gold and uranium content in the ore was 0.80 and 266 g/t, respectively. Experiments were carried out using a percolation column with a diameter of 300 mm and a height of 2000 mm. The ore mass in the column was 180 kg. The temperature during the tests was in the

range of 17–25°C. Leaching was carried out under the following conditions: H_2SO_4 concentration – 5 g/dm³, SCN^- concentration – 0.5 g/dm³, Eh – 490–510 mV, Fe^{3+} ion concentration – 1.0–1.5 g/dm³. Acid-soluble minerals contained in the ore comprised the source of iron ions. Hydrogen peroxide was used to oxidise Fe^{2+} ions. Pilot tests were carried out in a closed cycle with separate sorption of gold and uranium. Based on the research results, gold recovery reached 90%, while uranium recovery was 55%. Following gold and uranium leaching, the loaded activated carbons and ion exchange resins were obtained. It was established that the gold content on activated carbons was 0.5–0.6 mg/g, while the uranium content on ion exchange resins amounted to 30–35 mg/g. The reagent consumption was as follows: H_2SO_4 – 10.5 kg/t, KSCN – 0.94 kg/t, H_2O_2 – 0.65 kg/t. It is shown that the technology for simultaneous heap leaching of gold and uranium with sulphuric acid thiocyanate solutions offers efficient processing of the ore. The recovery rates of gold and uranium are comparable to those obtained during pilot tests for heap leaching of the ore using conventional technology, involving the individual two-stage leaching of these metals using sulphuric acid and cyanide solutions.

Keywords: heap leaching, oxidised ore, sulfuric acid leaching, thiocyanate, gold, uranium

For citation: Shipnigov A.A., Epiforov A.V., Sobennikov R.M., Musin E.D., Balikov S.V. Heap sulphuric-thiocyanate leaching of gold and uranium. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):821-828. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-821-828>. EDN: KDVAMS.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных и малозатратных методов добычи урана из руд является кучное выщелачивание (КВ), которое также позволяет рентабельно перерабатывать бедные и забалансовые руды. Нередко уран встречается в качестве попутного компонента в золотосодержащих рудах, для переработки которых также рентабельно использование метода КВ [1].

Традиционные схемы переработки золотоурановых руд заключаются в последовательном извлечении этих металлов [2, 3]. Причем для извлечения урана, как правило, используют растворы серной кислоты, а для извлечения золота – щелочные цианидные растворы. Выщелачивание золота и урана из руды можно осуществлять в наиболее удобной для недропользователя последовательности, однако существует ряд недостатков данной (традиционной) технологии переработки золотоурановых руд. Во-первых, переход из щелочной среды в кислую или наоборот увеличивает расход реагентов (кислоты или щелочи). Во-вторых, двухстадийная технология, включающая также промежуточные этапы отмывки штабеля, закисления/защелачивания имеет значительную продолжительность полного цикла переработки руды. Кроме того, совместное использование на предприятии кислотного и цианидного выщелачивания связано с высокими экологическими рисками и является серьезной угрозой здоровью для обслуживающего персонала. Ввиду вышесказанного возникает естественный интерес к поиску более оптимальных и безопасных методов комплексной переработки золотоурановых руд.

Для решения этой проблемы научными и

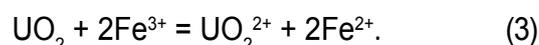
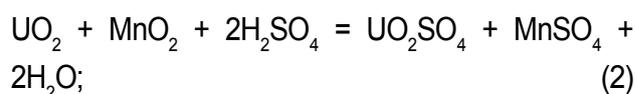
промышленными центрами во всем мире предлагаются альтернативные технологические схемы переработки золотоурановых руд с использованием реагентов-растворителей, способных работать в одной среде (кислой или щелочной). При этом выщелачивание золота и урана осуществляется одновременно либо последовательно без промежуточных стадий отмывки и нейтрализации [4–7].

Одним из перспективных направлений в решении данной задачи является совместное выщелачивание золота и урана в сернокислых средах с использованием нецианистых растворителей золота – тиоцианатов [8].

Уран в типичных урановых минералах встречается в четырех- (UO_2) и шестивалентной (UO_3) форме [9]. Выщелачивание шестивалентного урана серной кислотой происходит согласно реакции (1) с образованием уранил-сульфата:

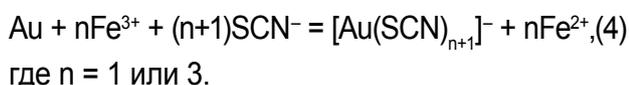


Четырехвалентный уран плохо растворяется в присутствии серной кислоты. Для увеличения скорости выщелачивания четырехвалентного урана применяют различные окислители [9–11]. Чаще всего в качестве окислителя используют пиролюзит (MnO_2) и ионы Fe^{3+} . В этом случае выщелачивание U^{4+} протекает согласно реакций (2) и (3):



Оптимальные условия сернокислотно-тиоцианатного выщелачивания золота сопоставимы с сернокислотным выщелачиванием урана: pH = 1–3, Eh = 450–550 мВ [12].

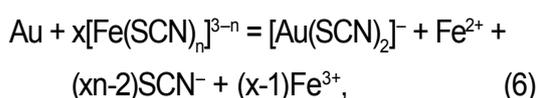
Окислителем золота, как и четырехвалентного урана, в данном случае являются ионы трехвалентного железа. Растворение золота тиоцианатом протекает с образованием дитиоцианоурат (I)-иона $[Au(SCN)_2]^-$ или тетратиоцианоурат (III)-иона $[Au(SCN)_4]^-$ по реакции (4).



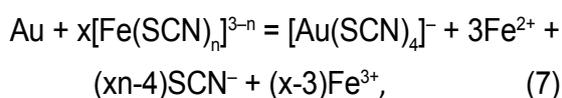
При тиоцианатном выщелачивании золота железо (3+) может образовывать тиоцианатные комплексы с координационным числом (n) от 1 до 5 в соответствии с уравнением (5), которые одновременно могут являться и окислителем, и растворителем золота [12] в соответствии с реакциями (6) и (7).



где $n =$ от 1 до 5.



где $x = 1$ при $n =$ от 2 до 5; $x = 2$ при $n = 1$.



где $x = 3$ при $n =$ от 2 до 5; $x = 4$ при $n = 1$.

Проведенные ранее исследования по совместному выщелачиванию золота и урана из окисленной золотоурановой руды в агитационном режиме [13–16] показали, что оптимальными условиями для выщелачивания золота из исследуемой руды являются следующие: температура $65^\circ C$; начальная концентрация серной кислоты – $10\text{--}15$ г/дм³; концентрация тиоцианата – $0,5$ г/дм³; концентрация ионов железа (III) в растворе будет $1\text{--}3$ г/дм³. При данных условиях продолжительность выщелачивания золота составляет $15\text{--}30$ мин, урана – до $4\text{--}6$ ч. Извлечение золота и урана составляет около 85 и 50% соответственно и сопоставимо с их извлечением по стандартной двухстадийной схеме выщелачивания с использованием цианида и серной кислоты [2, 3]. В данном случае продуктом выщелачивания являются серноокислые растворы, содержащие золото и уран. Для извлечения данных металлов из растворов можно использовать ионообменные смолы и активированные угли [17, 18].

Цель настоящей работы – определить

основные показатели совместного (одновременного) КВ золота и урана из окисленной золотоурановой руды серноокислыми тиоцианатными растворами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования по совместному КВ золота и урана проводили на окисленной золотоурановой руде одного из месторождений РФ. Химический и минеральный состав пробы руды идентичен пробам, использованным в ранее проводимых исследованиях по разделному выщелачиванию [3]. Проба на 98% состоит из литофильных компонентов со значительным преобладанием оксида кремния – $79,5\%$. Основными минералами, обладающими кристаллическим строением, являются плагиоклазы, калиевый полевой шпат, кварц и амфиболы. Содержание золота в пробе $0,8$ г/т, урана – 266 г/т, что характеризует исследуемую пробу как бедную по урану. Из рудных компонентов в количестве $3,01\%$ присутствует железо, в основном в окисленной форме. Проба относится к убогосульфидному типу руд.

Пилотные испытания по совместному КВ золота и урана проводили на руде, дробленной до крупности минус $40+0$ мм и загруженной в полипропиленовую перколяционную колонну диаметром 300 и высотой 2000 мм. Масса руды в колонне составляла 180 кг. Температура в процессе испытаний находилась в пределах $17\text{--}25^\circ C$.

Перед выщелачиванием проводили закисление руды в колонне серноокислыми растворами с концентрацией 10 г/дм³ и плотностью орошения 10 дм³/м²·ч. Закисление выполняли до появления кислой реакции в маточных растворах. После этого в раствор подавали тиоцианат калия (KSCN марки ХЧ). Этот момент был принят за начало выщелачивания золота и урана. Выщелачивание осуществляли при следующих условиях: концентрация H_2SO_4 – 5 г/дм³, концентрация SCN^- – $0,5$ г/дм³, Eh – $490\text{--}510$ мВ, концентрация ионов Fe^{3+} – $1,0\text{--}1,5$ г/дм³. Источником ионов железа служили кислоторастворимые минералы, содержащиеся в руде. В качестве окислителя ионов Fe^{2+} использовали пероксид водорода (35%).

Пилотные испытания выполнялись в замкнутом цикле с отдельной сорбцией золота и урана [18]. Сначала из раствора проводили селективную сорбцию золота на экстрадиро

ванный активированный уголь марки Norit RO 3515, загруженный в сорбционные колонки. Так как уранил-сульфат в кислых средах инертен к активированным углям, урансодержащие растворы после сорбции золота поступали в колонки с сильноосновным макропористым анионитом «D201» для сорбции урана. Растворы после сорбции подкрепляли серной кислотой, тиоцианатом, а также осуществлялась корректировка ОВП, после чего раствор подавали в колонку на орошение.

Пилотные испытания выполняли до установления устойчивой концентрации золота в продуктивных растворах менее 0,01 мг/дм³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Выщелачивание золота. На рис. 1 представлены результаты кучного выщелачивания золота сернокислыми тиоцианатными растворами.

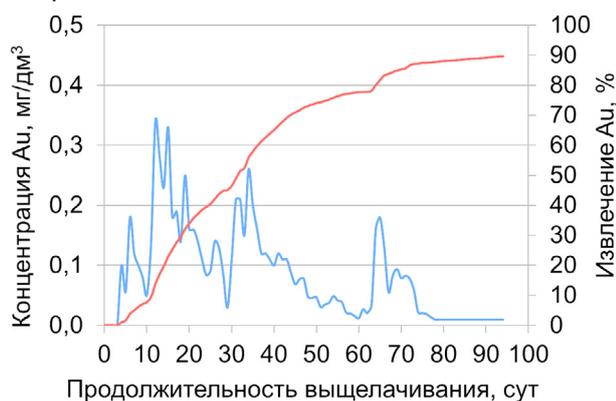


Рис. 1. Динамика кучного выщелачивания золота сернокислыми тиоцианатными растворами

Fig. 1. Dynamics of heap sulfate-thiocyanate leaching of gold

Показано, что кучное выщелачивание золота тиоцианатом при температурах ниже 45°C проходит с меньшей интенсивностью, чем цианидом, и в целом составляет около

трех месяцев.

На 67 сутки концентрация золота в маточном растворе КВ опустилась до 0,02–0,03 мг/дм³, что соответствовало извлечению около 78%. Известно, что снижение кинетики растворения золота в процессе тиоцианатного выщелачивания золота может быть вызвано образованием на поверхности золотин пленок нерастворимого тиоцианата золота (I) – AuSCN, которые блокируют поверхность металла от контакта с растворителем [19]. При используемом в пилотных испытаниях соотношении $Fe^{3+}/CNS^- = 2-3$ (0,4–0,5 г/дм³ SCN и 1–1,5 г/дм³ Fe^{3+}) основное количество тиоцианата в растворе находится в виде комплексов $[Fe(SCN)_n]^{3-n}$, которые собственно и являются растворителями золота в данных условиях. Процесс растворения золота тиоцианатными комплексами железа (III) сопровождается их восстановлением до комплексов железа (II) и снижением потенциала системы, что может приводить к образованию пассивирующей пленки простого тиоцианата золота (I) и снижать скорость растворения золота вплоть до полной остановки процесса.

Образовавшийся тиоцианат золота (I) растворяется при избытке свободных тиоцианионов в растворе. Основываясь на данной теории, на 67 сутки испытаний, когда концентрация золота в продуктивных растворах снизилась до критических значений, было принято решение повысить концентрацию тиоцианата в выщелачивающем растворе до значений 2,5–3,0 г/дм³, что соответствовало соотношению Fe^{3+}/CNS^- менее 0,5. Данная корректировка режима позволила увеличить концентрацию свободного тиоцианата, который способен растворять AuSCN.

При увеличении концентрации тиоцианата

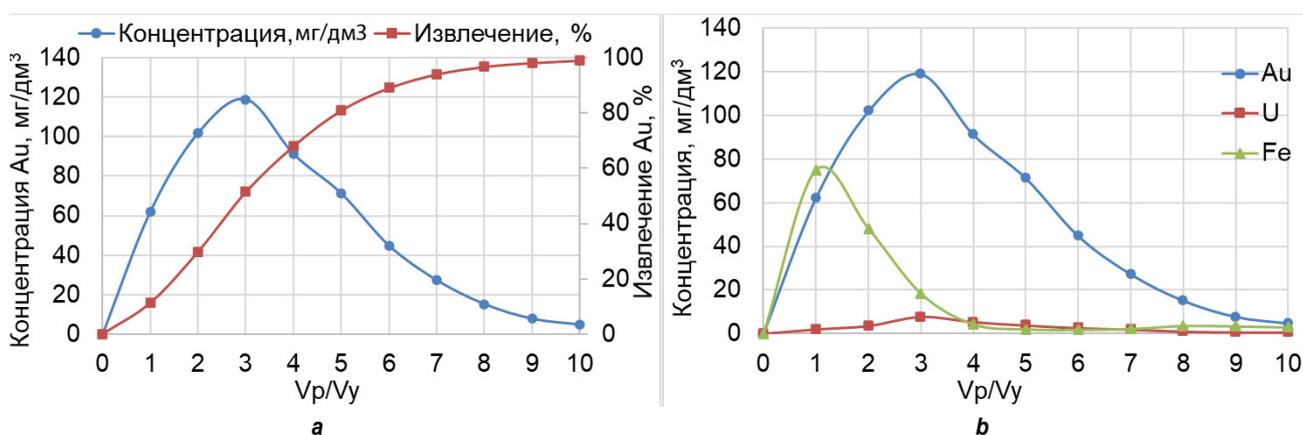


Рис. 2. Результаты десорбции золота (а) и кривые элюирования золота, урана и железа (б) из угля, насыщенного при кучном тиоцианатном выщелачивании (Vp/Vy – отношение объема раствора к объему угля)

Fig. 2. Results of gold stripping (a) and elution curves of gold, uranium and iron (b) from the loaded carbon under heap thiocyanate leaching (Vp/Vy – solution volume-to-carbon volume ratio)

в растворе растворение золота возобновилось. Концентрация благородного металла резко выросла с 0,02 до 0,18 мг/дм³. Изменение реагентного режима позволило дополнительно извлечь из руды около 12% золота (см. рис. 1). Конечное извлечение золота по завершении процесса КВ составило 90,1% при остаточном содержании в хвостах 0,073 г/т.

Конечным продуктом исследований по выщелачиванию золота являлись насыщенные активированные угли с содержанием золота 0,5–0,6 мг/г. Содержание железа в насыщенных углях составляло 2,1–2,5 мг/г, урана 0,9 мг/г. Данные угли могут быть переработаны по ранее предложенной схеме десорбции золота из углей, насыщенных в тиоцианатных растворах [20, 21], что подтверждается экспериментами. На рис. 2 представлены кривые десорбции Au, Fe и U из насыщенного угля.

Выщелачивание урана. На рис. 3 представлены результаты кучного выщелачивания урана серноокислыми тиоцианатными растворами.

Извлечение урана за период пилотных испытаний составило около 55%. Данный показатель был сопоставим с результатом стандартного КВ урана серной кислотой по двухстадиальной схеме [3].

Конечным продуктом исследований по выщелачиванию урана являлись насыщенные ионообменные смолы с содержанием урана 30–35 мг/г и железа 12–13 мг/г. Содержание золота в смолах составляло менее 0,05 кг/т, что является пределом обнаружения для используемого метода анализа. Отмечена высокая емкость ионита по тиоцианату. Для десорбции урана и примесей из ионита рекомендован элюент, содержащий серную и азотную кислоты. Данный элюент является распространенным в металлургии урана [22] и при его использовании происходит разруше-

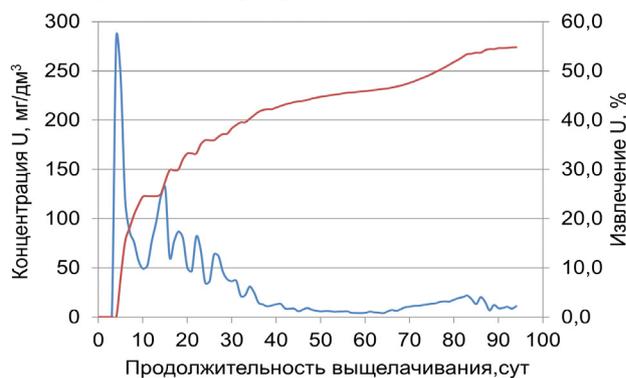


Рис. 3. Динамика кучного выщелачивания урана серноокислыми тиоцианатными растворами
Fig. 3. Dynamics of heap sulfate-thiocyanate leaching of uranium

ние (окисление) сорбированного тиоцианата как в жидкой фазе элюата, так и в фазе ионита.

Показано, что технология совместного кучного выщелачивания золота и урана серноокислыми тиоцианатными растворами позволяет эффективно перерабатывать исследуемую руду. Показатели извлечения золота и урана сопоставимы с показателями, полученными в ходе пилотных испытаний по кучному выщелачиванию исследуемой руды по стандартной технологии раздельного извлечения данных металлов с использованием серноокислых и цианидных растворов в две стадии [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов исследований по совместному (одновременному) кучному выщелачиванию золота и урана серноокислыми-тиоцианатными растворами можно сделать вывод, что извлечение золота и урана находится на уровне 90 и 55% соответственно. Суммарная продолжительность процесса составила 95 сут. Следует отметить, что тиоцианат является более безопасным веществом, чем цианид, и во многих странах его предельно допустимая концентрация в хвостах переработки руд не регламентируется.

Список источников

1. Котляр Ю.А., Меретуков М.А., Стрижко Л.С. Металлургия благородных металлов. М.: Руда и Металлы, 2005. 432 с.
2. Шипнигов А.А., Собенников Р.М., Епифоров А.В., Мусин Е.Д. Кучное выщелачивание окисленных золотоурановых руд // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXVII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Екатеринбург, 7–8 апреля 2022 г.). Екатеринбург: УГТУ, 2022. С. 190–194.
3. Шипнигов А.А., Собенников Р.М., Епифоров А.В., Мусин Е.Д., Григорьев С.Г. Кучное выщелачивание золота и урана из окисленной золотоурановой руды // Рациональное освоение недр. 2022. № 2. С. 66–71. <https://doi.org/10.26121/RON.2022.73.14.009>. EDN: BDRHMA.
4. Robinson R.E. Status report from South Africa // Processing of low-grade uranium ores (Vienna, 27 June – 1 July 1966). Vienna: International Atomic Energy Agency, 1967. P. 33–37.
5. Fleming C.A. A process for simultaneous recovery of gold and uranium from South African ores // Gold 100-Proceeding of the International Conference on Gold. Extractive Metallurgy of Gold, South African Institution of Mining and Metallurgy.

Johannesburg, 1986. Vol. 2. P. 301–309.

6. Молоков П.Б., Буйновский А.С., Макашеев Ю.Н., Арутюнян Д.Р. Разработка технологии совместного извлечения урана, золота и редкоземельных металлов из комплексных руд // Ядерная энергетика: технология, безопасность, экология, экономика, управление: сб. науч. тр. I Всерос. науч.-практ. конф. молодых атомщиков Сибири (г. Томск, 19–25 сентября 2010 г.). Томск: Томский политехнический университет, 2010. С. 47–48.
7. Ширяева В.В. Разработка комплексной технологии извлечения золота из комплексных золотоурановых руд с использованием комплексных роданидных растворов методом кучного выщелачивания // ГИАБ. 2012. С. 403–412.
8. Aylmore M.G. Alternative lixivants to cyanide for leaching gold ores // Gold Ore Processing. Project Development and Operations. 2016. Chapt. 27. P. 447–484. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00027-X>.
9. Venter R., Boylett M. The evaluation of various oxidants used in acid leaching of uranium // Hydrometallurgy Conference 2009 (Gauteng, 24–26 February 2009). Gauteng: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009. P. 445–455.
10. Ahmed S.H., Sheta M.E., Saleh G.M., Mahfouz M.G., Mohammed S.A., Abdel Aal M.M. Sulphuric acid leaching of uranium ore using MnO₂ as an oxidizing agent // Chemical Technology an Indian Journal. 2015. Vol. 10. Iss. 2. P. 60–68.
11. Литвиненко В.Г., Шелудченко В.Г., Филоненко В.С. Совершенствование процесса агитационного выщелачивания урановых руд // Горный журнал. 2018. № 7. P. 69–72. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.07.13>.
12. Кононова О.Н., Холмогоров А.Г., Кононов Ю.С. Сорбционное извлечение золота из растворов и пульп. Химизм процесса, селективность, технология. Красноярск: СФУ, 2011. 200 с.
13. Шипнигов А.А., Епифоров А.В., Собенников Р.М. Определение оптимальных параметров извлечения золота из золотоурановой руды серноокислыми тиоцианатными растворами // Металлургия цветных, редких и благородных металлов: сб. докл. XV Междунар. конф. им. члена-корреспондента РАН Геннадия Леонидовича Пашкова (г. Красноярск, 6–8 сентября 2022 г.). Красноярск: Научно-инновационный центр, 2022. С. 223–230. EDN: KDPLDC.
14. Шипнигов А.А., Епифоров А.В., Собенников Р.М. Исследование динамики выщелачивания золота и урана серноокислыми тиоцианатными растворами // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки сырья природного и техногенного происхождения (Плаксинские чтения – 2022): матер. Междунар. конф. (г. Владивосток 4–7 октября 2022 г.). Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2022. С. 329–332. <https://doi.org/10.24866/7444-5340-4>.
15. Shipnigov A.A., Epiforov A.V., Sobennikov R.M. Combined recovery of gold and uranium from gold-uranium ores // World Gold (Shenyang, 4–7 September 2023). Shenyang, 2023. P. 783–791.
16. Пат. № 2791169, Российская Федерация, С22В 60/02, С22В 11/00, С22В 3/06. Способ извлечения золота и урана из золотоурановых руд / А.А. Шипнигов, Е.Д. Мусин, А.В. Епифоров; заявитель и патентообладатель АО «Иргиредмет». Заявл. 28.06.2021; опубл. 03.03.2023. Бюл. № 7.
17. Собенников Р.М., Епифоров А.В., Шипнигов А.А. Исследования по сорбции золота и урана из серноокислых растворов, содержащих тиоцианат-ион // Современные технологии производства цветных металлов: матер. Междунар. науч. конф., посвящ. 80-летию С.С. Набойченко (г. Екатеринбург, 24–25 марта 2022 г.). Екатеринбург: УРФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2022. С. 98–104.
18. Пат. № 2791113, Российская Федерация, С22В 11/00, С22В 60/02, С22В 3/24, С22В 15/04. Способ извлечения золота и урана из серноокислых растворов / А.А. Шипнигов, Е.Д. Мусин, А.В. Епифоров; заявитель и патентообладатель АО «Иргиредмет». Заявл. 28.06.2021; опубл. 02.03.2023. Бюл. № 7.
19. Azizitorghabeh A., Wang J., Ramsay J.A., Ghahreman A. A review of thiocyanate gold leaching – chemistry, thermodynamics, kinetics and processing // Minerals Engineering. 2021. Vol. 160. P. 106689. <https://doi.org/10.1016/j.mining.2020.106689>.
20. Епифоров А.В., Козлов А.А., Набиулин Р.Н., Немчинова Н.В. Извлечение золота из упорных сульфидных концентратов с использованием автоклавного окисления и тиоцианатного выщелачивания // Цветные металлы. 2021. № 11. С. 9–16. <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.11.01>.
21. Kozlov A.A., Epiforov A.V., Nemchinova N.V. The carbon adsorption technology of gold-thiocyanate complexes from sulfuric acid solutions containing copper and iron // Proceedings of XXX International Mineral Processing Congress (Cape Town, 18–20 October 2020). Cape Town, 2021. P. 2180–2191.
22. Нестеров Ю.В. Иониты и ионообмен. Сорбционная технология при добыче урана и других металлов методом подземного выщелачивания. М.: ОАО «Атомредметзолото», 2007. 480 с.

References

1. Kotlyar Yu. A., Meretukov M.A., Strizhko L.S. *Metallurgy of precious metals*. Moscow: Ore and Metals; 2005, 432 p. (In Russ.).
2. Shipnigov A.A., Sobennikov R.M., Epiforov A.V., Musin E.D. Heap leaching of oxidized gold-uranium ores. In: *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya: materialy XXVII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Scientific foundations and processing practice of ores and technogenic raw materials: materials of the 27th International scientific and technical conference*. 7–8 April, 2022, Yekaterinburg, Yekaterinburg: Ural State Mining University; 2022, p. 190-194. (In Russ.).
3. Shipnigov A.A., Sobennikov R.M., Epiforov A.V., Musin E.D., Grigoriev S.G. Heap leaching of gold and uranium from oxidized gold-uranium ore. *Ratsionalnoe osvoenie nedr*. 2022;2:66-71. (In Russ.).

<https://doi.org/10.26121/RON.2022.73.14.009>. EDN: BDRHMA.

4. Robinson R.E. Status report from South Africa. In: *Processing of low-grade uranium ores*. 27 June – 1 July 1966, Vienna. Vienna: International Atomic Energy Agency; 1967, p. 33-37.
5. Fleming C.A. A process for simultaneous recovery of gold and uranium from South African ores. In: *Gold 100-Proceeding of the International Conference on Gold. Extractive Metallurgy of Gold, South African Institution of Mining and Metallurgy*. Johannesburg; 1986, vol. 2, p. 301-309.
6. Molokov P.B., Bujnovskij A.S., Makaseev Yu.N., Arutyunyan D.R. Developing technology for the joint recovery of uranium, gold and rare earth metals from complex ores. In: *Yadernaya energetika: tekhnologiya, bezopasnost', ekologiya, ekonomika, upravlenie: sbornik nauchnykh trudov I Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodykh atomshchikov Sibiri = Nuclear energy: technology, safety, ecology, economics, management: collection of scientific works of the 1st All-Russian scientific and practical conference of young nuclear workers of Siberia*. 19–25 September 2010, Tomsk. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2010; p. 47-48. (In Russ.).
7. Shiryayeva V.V. Development of an integrated technology for gold extraction from complex gold-uranium ores using heap thiocyanate leaching. In: *GIAB*. 2012;403-412.
8. Aylmore M.G. Alternative lixiviants to cyanide for leaching gold ores. In: *Gold Ore Processing. Project Development and Operations*. 2016;27:447-484. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00027-X>.
9. Venter R., Boylett M. The evaluation of various oxidants used in acid leaching of uranium. In: *Hydrometallurgy Conference 2009*. 24–26 February 2009, Gauteng. Gauteng: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy; 2009. P. 445–455.
10. Ahmed S.H., Sheta M.E., Saleh G.M., Mahfouz M.G., Mohammed S.A., Abdel Aal M.M. Sulphuric acid leaching of uranium ore using MnO₂ as an oxidizing agent. *Chemical Technology an Indian Journal*. 2015;10(2):60-68.
11. Litvinenko V.G., Sheludchenko V.G., Filonenko V.S. Improvement of agitation leaching of uranium ore. *Gornyj zhurnal*. 2018;7:69-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.07.13>.
12. Kononova O.N., Holmogorov A.G., Kononov Yu.S. *Sorption extraction of gold from solutions and pulps*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2011; 200 p. (In Russ.).
13. Shipnigov A.A., Epiforov A.V., Sobennikov R.M. Finding the optimum conditions for recovery of gold from gold-uranium ore using sulfuric acid solutions of thiocyanate. In: *Metallurgiya cvetnykh, redkih i blagorodnykh metallov: sbornik dokladov XV Mezhdunarodnoj konferencii imeni chlena-korrespondenta RAN Gennadiya Leonidovicha Pashkova = Metallurgy of non-ferrous, rare and noble metals: collection of reports of 15th International conference named after the Corresponding Member of the RAS Gennady L. Pashkov*. 6–8 September 2022, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Nauchno-innovacionnyj centr; 2022, p. 223-230. (In Russ.). EDN: KDPLDC.
14. Shipnigov A.A., Epiforov A.V., Sobennikov R.M. Investigation of gold and uranium sulfate-thiocyanate leaching dynamics. In: *Sovremennyye problemy kompleksnoy i glubokoy pererabotki syr'ya prirodnogo i tekhnogennogo proiskhozhdeniya (Plaksinskiye chteniya – 2022) = Modern problems of integrated and deep processing of natural and technogenic mineral raw materials (Plaksinsky Readings - 2022): materials of the international conference*. 4–7 October 2022, Vladivostok. Vladivostok: Far Eastern Federal University; 2022, p. 329-332. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/7444-5340-4>.
15. Shipnigov A.A., Epiforov A.V., Sobennikov R.M. Combined recovery of gold and uranium from gold-uranium ores. In: *World Gold*. 4–7 September 2023, Shenyang. Shenyang; 2023, p. 783-791.
16. Shipnigov A.A., Musin E.D., Epiforov A.V. *Method of gold and uranium recovery from gold-uranium ores*. Patent RF, no. 2791169; 2023. (In Russ.).
17. Sobennikov R.M., Epiforov A.V., Shipnigov A.A. Research on gold and uranium sorption from sulfuric acid solutions containing thiocyanate ion. In: *Sovremennyye tekhnologii proizvodstva cvetnykh metallov: materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 80-letiyu S. S. Naboichenko = Modern technologies of non-ferrous metal production: materials of the International scientific conference dedicated to the 80th anniversary of S. S. Naboichenko*. 24–25 March 2022, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; 2022, p. 98-104. (In Russ.).
18. Shipnigov A.A., Musin E.D., Epiforov A.V. *Method of gold and uranium recovery from sulfuric acid solutions*. Patent RF, no. 2791113; 2023. (In Russ.).
19. Azizitorghabeh A., Wang J., Ramsay J.A., Ghahreman A. A review of thiocyanate gold leaching – chemistry, thermodynamics, kinetics and processing. *Minerals Engineering*. 2021;160:106689. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106689>.
20. Epiforov A.V., Kozlov A.A., Nabiulin R.N., Nemchinova N.V. Recovery of gold from refractory sulphide concentrates by means of pressure oxidation and thiocyanate leaching. *Tsvetnye Metally*. 2021;11:9-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.11.01>.
21. Kozlov A.A., Epiforov A.V., Nemchinova N.V. The carbon adsorption technology of gold-thiocyanate complexes from sulfuric acid solutions containing copper and iron. In: *Proceedings of 30th International Mineral Processing Congress*. 18–20 October 2020, Cape Town. Cape Town; 2021, p. 2180-2191.
22. Nesterov Yu.V. *Ionites and ion exchange. Sorption technology for the extraction of uranium and other metals using the underground leaching method*. Moscow: OAO “Atomredmetzoloto”; 2007, 480 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шипнигов Антон Андреевич,

мл. науч. сотр. лаборатории металлургии,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 38, Россия
✉ shipn.anton@yandex.ru

Епифоров Александр Владимирович,

к.т.н.,
ст. науч. сотр. лаборатории металлургии,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 38, Россия
epiforov@irgiredmet.ru

Собенников Роман Михайлович,

мл. науч. сотр. лаборатории металлургии,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 38, Россия
rsobenn@gmail.com

Мусин Евгений Дмитриевич,

к.т.н.,
заместитель генерального директора
по научной работе,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 38, Россия
MusinE@irgiredmet.ru

Баликов Станислав Васильевич,

д.т.н.,
директор бизнес-центра,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 38, Россия
balikov@irgiredmet.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 02.09.2023 г.;
одобрена после рецензирования 16.11.2023 г.;
принята к публикации 21.11.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton A. Shipnigov,

Junior Researcher of the Laboratory of Metallurgy,
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and
Diamonds, 38, Gagarin Boulevard, Irkutsk 664025, Russia
✉ shipn.anton@yandex.ru

Alexander V. Epiforov,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of the Laboratory of Metallurgy,
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and
Diamonds, 38, Gagarin Boulevard, Irkutsk 664025, Russia
epiforov@irgiredmet.ru

Roman M. Sobennikov,

Junior Researcher of the Laboratory of Metallurgy,
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and
Diamonds, 38, Gagarin Boulevard, Irkutsk 664025, Russia
rsobenn@gmail.com

Evgeniy D. Musin,

Cand. Sci. (Eng.),
Deputy Director General for Research,
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and
Diamonds, 38, Gagarin Boulevard, Irkutsk 664025, Russia
MusinE@irgiredmet.ru

Stanislav V. Balikov,

Dr. Sci. (Eng.),
Director of the Business Center,
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and
Diamonds, 38, Gagarin Boulevard, Irkutsk 664025, Russia
balikov@irgiredmet.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 02.09.2023;
approved after reviewing 16.11.2023;
accepted for publication 21.11.2023.

Уважаемые коллеги!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации

I. Статья представляется в **электронном и распечатанном видах**. Рекомендуемый объем статьи не менее 10 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение.
2. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (4-5); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон и e-mail (вся информация предоставляется одним файлом).
3. Статья должна иметь личную подпись автора; на статьях адъюнктов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

II. **Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail** должны быть также представлены по электронной почте: pgp@istu.edu в виде файла с расширением *.DOC – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с приложением файлов (**представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах**);
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

«iPolytech Journal» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «iPolytech Journal», реферируются и рецензируются.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.

Телефон: (3952) 40-57-56 – Привалова Галина Петровна, ответственный секретарь.

Факс: (3952) 405-100, e-mail: pgp@istu.edu

ISSN 2782-4004 (print)
ISSN 2782-6341 (online)

iPolytech Journal

Том 27, № 4. 2023 / Vol. 27, № 4. 2023



Редактор Я.В. Макшанцева
Дизайнер В.Г. Лисицин
Ответственный секретарь
Г.П. Привалова
Перевод на английский язык
Tomas A. Beavitt,
Н.Г. Поповой, В.В. Батицкой
Верстка В.Г. Дмитриева

Выход в свет 29.12.2023 г.
Формат 60x90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 25.
Тираж 500 экз. Номер по реестру 105 / 3н.

Издание распространяется **бесплатно**