

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

# iPolytech Journal

Tom 28, № 4. 2024 / Vol. 28, No 4. 2024

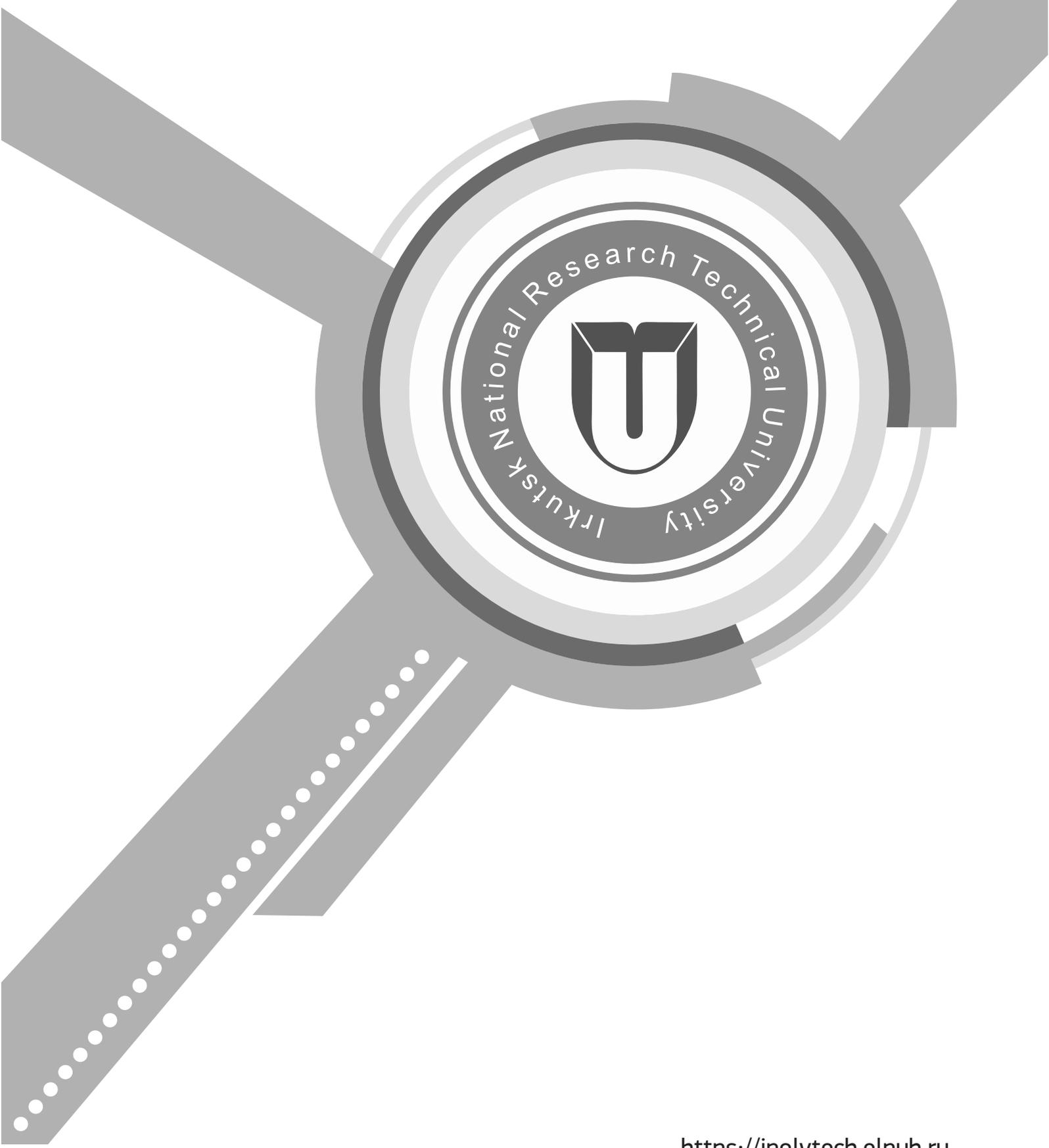


<https://ipolytech.ru>

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

# iPolytech Journal

Tom 28, № 4. 2024 / Vol. 28, No. 4. 2024



<https://ipolytech.elpub.ru>

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

# iPolytech Journal

Том 28, № 4. 2024 / Vol. 28, No. 4. 2024



## 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 - **ежеквартально. 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 г.**

(Ранее действовавшие Свидетельства:

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

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

ПИ № ФС77-47902 от 22 декабря 2011 г.;

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, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

---

### Издательство:

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

---

### Адрес редакции:

664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
e-mail: [pgp@istu.edu](mailto:pgp@istu.edu)

---

<https://ipolytech.elpub.ru>

## SCHOLARLY 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). Periodicity: Quarterly

Periodicity: Quarterly 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 Publisher:

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education,  
Irkutsk National Research Technical University (INRTU)  
83, Lermontov St. Irkutsk, 664074, Russian Federation

---

### Publishers:

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education  
Irkutsk National Research Technical University (INRTU)  
83A, Lermontov St. Irkutsk, 664074, Russian Federation

---

### Editorial office:

83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation  
e-mail: [pgp@istu.edu](mailto:pgp@istu.edu)



## Редакционная коллегия

### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

### ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

**НЕМЧИНОВА Н.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Металлургия»

**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» (Иркутск, Россия)

### ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

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

**БЛЮМЕНШТЕЙН В.Ю.**, д. т. н., профессор Кузбасского государственного технического университета (Кемерово, Россия)

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

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

**ГАВЛИК ЮЗЕФ**, профессор кафедры технологии производства и автоматизации Краковского технологического университета (Краков, Польша)

**ЕРМОЛОВ И.Л.**, д.т.н., доцент, профессор РАН, заместитель директора по научной работе Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (Москва, Россия)

**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 (Москва, Россия)

**КИМ Инсу**, доцент кафедры электротехники Университета Инха (Инчхон, Южная Корея)

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

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

**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 (Иркутск, Россия)

**ЛИХИ Пол**, профессор кафедры ветроэнергетики, Университетский колледж Корка, исследователь, Центр морских, климатических и энергетических исследований Ирландского научного фонда MAREI (Корк, Ирландия)

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

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

**МУКЕШ Кумар Патхак**, профессор, заведующий кафедрой электротехники Индийского технологического университета Рурки (Рурки, Индия)

**МЫМРИН В.А.**, д. г-м. н., профессор Федерального университета штата Парана (Куритиба, Бразилия)

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

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

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

**РАШИДИ Мохаммад Мехди**, доктор, профессор Университета Тунци (Шанхай, Китай)

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

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

**СТЫЧИНСКИ З.А.**, профессор Университета Отто-фон-Герике (Магдебург, Германия)

**СУНЬ Хуапин**, профессор Цзянсукого университета (Чженьцзян, Китай)

**СУСЛОВ К.В.**, д.т.н., профессор Национального исследовательского университета «МЭИ» (Москва, Россия)

**СЮЭМЭЙ Чжен**, профессор кафедры электротехники Харбинского технологического университета (Харбин, Китай)

**ЛЮ Фанг**, профессор Центрального Южного Университета (Чанша, провинция Хунань, Китай)

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

**ФИШОВ А.Г.**, д.т.н., профессор Новосибирского государственного технического университета (Новосибирск, Россия)

**ШОЛЬТЕС Бертольд**, директор Института металловедения Кассельского университета (Кассель, Германия)

## Editorial Board

---

### CHIEF EDITOR:

**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)

### DEPUTIES OF CHIEF EDITOR:

**Semen A. ZAIDES**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Professor of the Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies, Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief in Mechanical engineering (Irkutsk, Russia)

**Nina V. NEMCHINOVA**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Head of the Department of Metallurgy, Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief Metallurgy (Irkutsk, Russia)

**Denis S. FEDOSOV**, Cand. 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)

### MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

**Mikhail V. KORNIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University, chairman of the editorial board (Irkutsk, Russia)

**Vladimir Yu. BAZHIN**, Dr. Sci. (Eng.), Dean of the Mineral Resources Processing Faculty, Saint Petersburg Mining University named after the Empress Catherine II (Saint Petersburg, Russia)

**Valery Yu. BLUMENSTEIN**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Kuzbass State Technical University (Kemerovo, Russia)

**Aleksander I. BOLDYREV**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)

**Yury S. BOROVNIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Novgorod State University n.a. Yaroslav-the-Wise (Veliky Novgorod, Russia)

**Josef GAVLIK**, Full Professor, Department of Production Technology and Automation, Krakow University of Technology (Krakow, Poland)

**Ivan L. ERMOLOV**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Research, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

**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)

**Insu KIM**, Associate Professor of Electrical Engineering at Inha University (Incheon, South Korea)

**Aleksander M. KLER**, Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

**Irina N. KOLOSOK**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

**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)

**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)

**Sergey V. MAMYACHENKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Head of the Department of Nonferrous Metallurgy, Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russia)

**Igor V. MARCHUK**, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Director of the Mechanics and Mathematics Department, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russia)

**Pathak Kumar MUKESH**, Full Professor, Head of Department of Indian Institute of Technology Roorkee (Roorkee, India)

**Vsevolod A. MYMRIN**, Dr. Sci. (Geology), Professor, Federal University of Parana (Curitiba, Brazil)

**Pyotr M. OGAR**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Bratsk State University (Bratsk, Russia)

**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)

**Vasily I. PANTELEEV**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Head of the Department of Electrical Systems, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

**Mohammad Mehdi RASHIDI**, Professor Tongji University, (China)

**Sergey M. SENDEROV**, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

**Valery A. STENNIKOV**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Director, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

**Zbigniew A. STYCZYNSKI**, Professor, Otto-von-Guericke University (Magdeburg, Germany)

**Huaping SUN**, Professor, Jiangsu University (Zhenjiang, China)

**Konstantin V. SUSLOV**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (Moscow, Russia)

**Xuemei ZHENG**, Professor of the Department of Electrical Engineering of Harbin University of Technology (Harbin, China)

**Fang LIU**, Professor, Central Southern University (Changsha, Hunan Province, China)

**Mikhail L. KHEIFETS**, Dr. Sci. (Eng.), Director, Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

**Aleksander G. FISHOV**, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia)

**Berhoit SCHOLTES**, Director, Institute of Metal Science, University of Kassel (Kassel, Germany)



## Содержание

---

### Машиностроение

---

- Пантюхина Е.В., Борисов А.А., Васин С.А., Клентак А.С.** Математическое описание вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок в бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах с наклонным диском и тангенциальными карманами ..... 466
- Распопина В.Б., Мартынова В.В., Ступина Е.А.** Влияние направления печати по FDM-технологии на механические свойства изделия ..... 477
- Свинин В.М., Ушаков В.А., Савилов А.В., Пятых А.С., Иринчиев А.А.** Оценка эффективности подавления автоколебаний при резании по изменению объема их энергии ..... 488

### Энергетика

---

- Ахтырский К.А., Кабиров В.А., Семенов В.Д., Торгаева Д.С.** Многоканальный элемент выбора медианного сигнала ..... 504
- Баннов Д.М., Полищук В.И.** Применение микропроцессорного блока релейной защиты для диагностирования внутренних повреждений электрооборудования электроустановок ..... 521
- Билал Али М., Аббас Казми С.А.** Зелёные энергетические системы для электромобилей с учётом телекоммуникационной системы на примере Пакистана (англ.) ..... 534
- Васьков А.Г.** Выбор состава включённого генерирующего оборудования солнечно-дизельного комплекса ..... 550
- Донской И.Г.** Численное моделирование процесса расплавления цилиндрического образца с локализованным источником тепловыделения ..... 563
- Рогов В.Ю.** Экологизированное использование ресурсов сернистых углей Иркутского бассейна как фактор эволюции теплоэнергетики региона ..... 573
- Сидиков Ш.Н., Русина А.Г., Осгонбаатар Т., Арестова А.Ю., Буренцагаан Б.** Оценка влияния гидроаккумулирующей электростанции на нормальный режим работы электроэнергетической системы Монголии ..... 583
- Чэнь Ц., Ван Л., Дрегля А., Чистякова Е., Юй Ч.** Оценка эквивалентных параметров ветроэлектростанций с асинхронными генераторами во время порывов ветра: подход на основе анализа данных (англ.) ..... 597

### Металлургия

---

- Булатов К.В., Жуков В.П., Меньшиков В.А., Братыгин Е.В.** Физическое моделирование процесса разделения двух несмешивающихся жидкостей в плавильном агрегате «Победа» при наличии локальной зоны барботажного перемешивания расплава боковыми и донными фурмами ..... 612
- Ерохина О.О., Пирогова Н.А.** Каталитическое влияние карбидообразующих оксидов на процесс графитизации углеродных изделий, эксплуатируемых в металлургии ..... 623
- Радионов Е.Ю.** Разработка методики постановки высокоамперного электролизёра на электрический обжиг с использованием плавких вставок ..... 634
- Фернандес Пенья А., Бажин В.Ю., Макушин Д.В.** К вопросу получения высоколегированных алюминиевых сплавов из вторичного металлизированного сырья ... 647

## Content

---

### Mechanical engineering

---

- Pantyukhina E.V., Borisov A.A., Vasin S.A., Klentak A.S.** Mathematical description of the probability of capturing rod-shaped stepped blanks in hopper feeding devices with an inclined disk and tangential pockets ..... 466
- Raspopina V.B., Martynova V.V., Stupina E.A.** Effect of FDM printing direction on the mechanical properties of products..... 477
- Svinin V.M., Ushakov V.A., Savilov A.V., Pyatykh A.S., Irincheev A.A.** Suppression efficiency of self-excited vibrations in machining evaluated by changes in their energy..... 488

### Power engineering

---

- Akhtyrskiy K.A., Kabirov V.A., Semenov V.D., Torgaeva D.S.** Multi-channel adaptive median signal filter ..... 504
- Bannov D.M., Polishchuk V.I.** Application of a microprocessor-based relay protection unit for identifying internal faults of electrical equipment of electrical installations. .... 521
- Bilal Ali M., Abbas Kazmi S.A.** Green energy systems for powering electric vehicles considering telecommunication system with case study of Pakistan (In Eng.). .... 534
- Vaskov A.G.** Selection of generating equipment for a solar-diesel complex. .... 550
- Donskoy I.G.** Numerical simulation of the melting process of a cylindrical sample with a localized heat source. .... 563
- Rogov V.Yu.** Ecologically sound use of sulfur-containing coal resources of the Irkutsk basin as a factor in the evolution of the regional thermal power industry..... 573
- Sidikov S.N., Rusina A.G., Osgonbaatar T., Arestova A.Yu., Burentsagaan B.** Assessing the impact of a pumped-storage power station on the normal operation of the Mongolian power system..... 583
- Chen Jianhua, Wang Liguu, Dreglea A., Chistyakova E., Yu Chunlai.** An approach to estimate the equivalent parameters of a wind farm with DFIGs during wind gusts based on data-driven analysis (In Eng.)..... 597

### Metallurgy

---

- Bulatov K.V., Zhukov V.P., Menshchikov V.A., Bratygin E.V.** Physical simulation of separating two immiscible liquids in the “Pobeda” smelting unit with localized melt sparging by means of side and basal tuyeres. .... 612
- Erokhina O.O., Pirogova N.A.** Catalytic effect of carbide-forming oxides on the graphitization of carbon objects used in metallurgy..... 623
- Radionov E.Yu.** Development of a technology for setting a high-amperage electrolytic cell for electrical preheating using fusible links..... 634
- Fernandes Penya A., Bazhin V.Yu, Makushin D.V.** Valuable aluminum alloys obtained from secondary metallized raw materials. .... 647



## 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 (**Категория К-1**).

«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, ВИНТИ 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



## Математическое описание вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок в бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах с наклонным диском и тангенциальными карманами

Е.В. Пантюхина<sup>1✉</sup>, А.А. Борисов<sup>2</sup>, С.А. Васин<sup>3</sup>, А.С. Клентак<sup>4</sup>

<sup>1,3</sup>Тульский государственный университет, Тула, Россия

<sup>2</sup>3-й Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации, Нижегородская область, Смолино, Россия

<sup>4</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

**Резюме.** Цель – разработать математическую модель вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок в механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах с наклонным диском и тангенциальными карманами. Модель должна учитывать влияние на производительность устройства его конструктивных и кинематических параметров, а также параметров заготовок. Объектом исследований явились механические дисковые бункерные загрузочно-ориентирующие устройства с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами, в которых реализовано активное ориентирование упомянутых заготовок путем их опрокидывания на специальных опорах, размещенных под вращающимся диском. Опрокидывание осуществляется под действием силы тяжести. При построении математических моделей использовались методы теории вероятностей, аналитической пространственной геометрии, теоретической механики и общие физические законы. В работе рассматривается методика построения математической модели вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок тел вращения в исследуемых устройствах с наклонным диском и тангенциальными карманами. Предложен алгоритм определения каждого коэффициента разработанной модели. Разработанная модель представляет собой произведение вероятности нахождения стержневых заготовок по направлению к тангенциально расположенному карману в благоприятном для их захвата положении, вероятности отсутствия помех при захвате заготовки от ее взаимосцепляемости с другими заготовками и вероятности отсутствия помех от окружной скорости захватывающих органов устройства. Таким образом, применение разработанных математических моделей вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок тел вращения позволяет на ранних этапах проектирования оценить с высокой точностью фактическую производительность механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами.

**Ключевые слова:** вероятность захвата, автоматическая загрузка, ориентирование заготовок, бункерное загрузочно-ориентирующее устройство

**Для цитирования:** Пантюхина Е.В., Борисов А.А., Васин С.А., Клентак А.С. Математическое описание вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок в бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах с наклонным диском и тангенциальными карманами // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 466–476. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-466-476>. EDN: TODCIN.

## Mathematical description of the probability of capturing rod-shaped stepped blanks in hopper feeding devices with an inclined disk and tangential pockets

Elena V. Pantuykhina<sup>1✉</sup>, Alexander A. Borisov<sup>2</sup>, Sergey A. Vasin<sup>3</sup>, Anna S. Klentak<sup>4</sup>

<sup>1,3</sup>Tula State University, Tula, Russia

<sup>2</sup>3rd Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Nizhny Novgorod Region, Smolino, Russia

<sup>4</sup>Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

**Abstract.** In this work, we present a mathematical model of the capture probability of rod-shaped stepped blanks in mechanical disk hopper feeding devices with an inclined disk and tangential pockets. The model must take into account the influence of the design and kinematic parameters of the device on its performance, as well as those of the workpieces. The object of the research was a mechanical disk hopper feeding device having an inclined rotating disk and pockets tangentially located along its periphery, whose active orientation of the mentioned blanks is implemented by overturning them on special supports placed under the rotating disk. The tipping action is carried out under the action of gravity. For the construction of mathematical models, methods based on probability theory, analytical spatial geometry, theoretical mechanics, and general physical laws were used. The methodology for constructing a mathematical model of the probability of capture of rod-shaped step blanks of bodies of revolution in the studied devices with an inclined disk and tangential pockets is described. Algorithms for determining each coefficient of the developed model are presented. The developed model is a product of the probability of finding the rod blanks in a position favorable for their gripping in the direction of the tangentially located pocket, the probable absence of encumbrance during gripping of the blank due to its interlocking with other blanks, and the probable absence of encumbrance as a result of the peripheral speed of the gripping organs of the device. Thus, the developed mathematical models for calculating the capture probability of rod-shaped step blanks of rotational parts can be used at early design stages to estimate with high accuracy the actual productivity of mechanical disk hopper feeding devices with an inclined rotating disk and pockets tangentially located along their periphery.

**Keywords:** gripping probability, automatic feeding, workpiece orientation, hopper feeding-orienting device

**For citation:** Pantuykhina E.V., Borisov A.A., Vasin S.A., Klentak A.S. Mathematical description of the probability of capturing rod-shaped stepped blanks in hopper feeding devices with an inclined disk and tangential pockets. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):466-476. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-466-476>. EDN: TODCIH.

### ВВЕДЕНИЕ

Механические дисковые бункерные загрузочно-ориентирующие устройства (БЗУ) применяются достаточно широко в массовых производствах (например, производство патронов различных видов оружия, строительно-монтажных патронов, продукции машино- и приборостроения, пищевой продукции), где для выполнения некоторых видов технологических операций (вытяжка, сборка, упаковка и др.) в автоматические машины и линии требуется автоматизированная подача с производительностью свыше 150 шт/мин небольших заготовок различных форм в требуемом ориентированном положении<sup>5</sup> [1, 2]. При этом для выполнения данной задачи БЗУ должны надежно функционировать, обеспечивая безотказную работу технологического оборудования без сбоев и простоев<sup>6</sup> [3–7].

Основная особенность БЗУ, заключающаяся в вероятностном принципе их работы при захвате одной заготовки из некоторого объема засыпанных в бункер заготовок с помощью захватывающих органов в виде карманов, требует при проектировании БЗУ решения целого комплекса задач: разработка конструктивных ограничений на захватывающие и ориентирующие органы БЗУ, при которых будут обеспечено надежное функционирование устройства, построение математических моделей процессов ориентирования и выдачи заготовок в БЗУ,

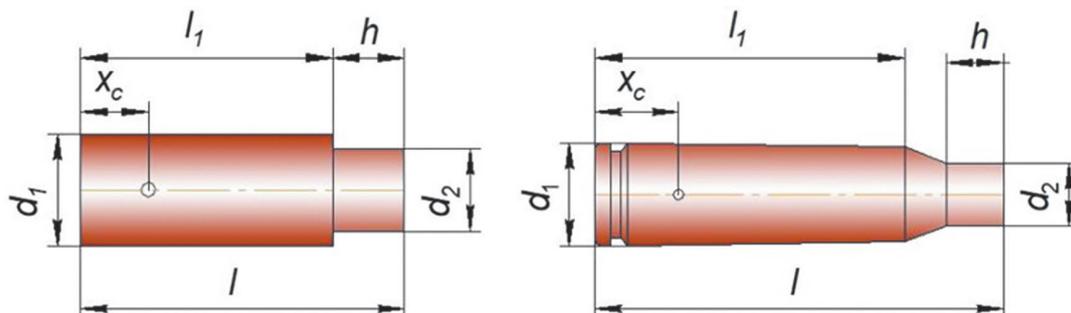
<sup>5</sup>Бляхеров И.С., Варьяш Г.М., Иванов А.А., Клусов И.А., Комаров Г.В., Маткин Ю.Л. [и др.]. Автоматическая загрузка технологических машин: справочник. М.: Машиностроение, 1990. 400 с. EDN: WQPXRB.

<sup>6</sup>Волчкевич Л.И. Надежность автоматических линий: учеб. пособ. М.: Машиностроение, 1989. 308 с.

позволяющие определить кинематические ограничения на захватывающие и ориентирующие органы БЗУ, и разработка математических моделей вероятности захвата заготовок в БЗУ для описания производительности БЗУ [8–10]. Наиболее важной из представленных задач является разработка математической модели вероятности захвата, которая позволяет описать влияние на производительность БЗУ его конструктивных и кинематических параметров, геометрических параметров заготовок, коэффициентов трения, уровня заполнения бункера заготовками и, исходя из этого, определить условия, при которых производительность БЗУ будет максимальной [11].

По расположению захватывающих органов механические дисковые БЗУ бывают двух типов: с радиально расположенными и тангенциально расположенными захватывающими органами. Каждый из этих типов БЗУ характеризуется целым рядом особенностей в зависимости от конфигурации органов захвата, способа ориентирования заготовок и их выдачи из захватывающих органов [12–14]. В зависимости от формы, свойств и геометрических размеров заготовок выбирается наиболее оптимальный из всех существующих видов БЗУ [4, 12, 15].

Для стержневых ступенчатых заготовок тел вращения (рис. 1), отличающихся явным смещением центра масс относительно продольной оси симметрии, радиальное расположение карманов существенно снижает вероятность их захвата, что отрицательно сказывается на производительности БЗУ. Использование в таких типах БЗУ пассивного ориентирования заготовок вместо активного приводит не только к еще большему снижению производительности, но и повышению количества бракованных (деформированных при ворошении в бункере БЗУ) заготовок, которые могут многократно захватываться и сбрасываться при их неправильном захвате обратно в общую массу, что является недопустимым при производстве некоторых видов изделий, например ответственного назначения.

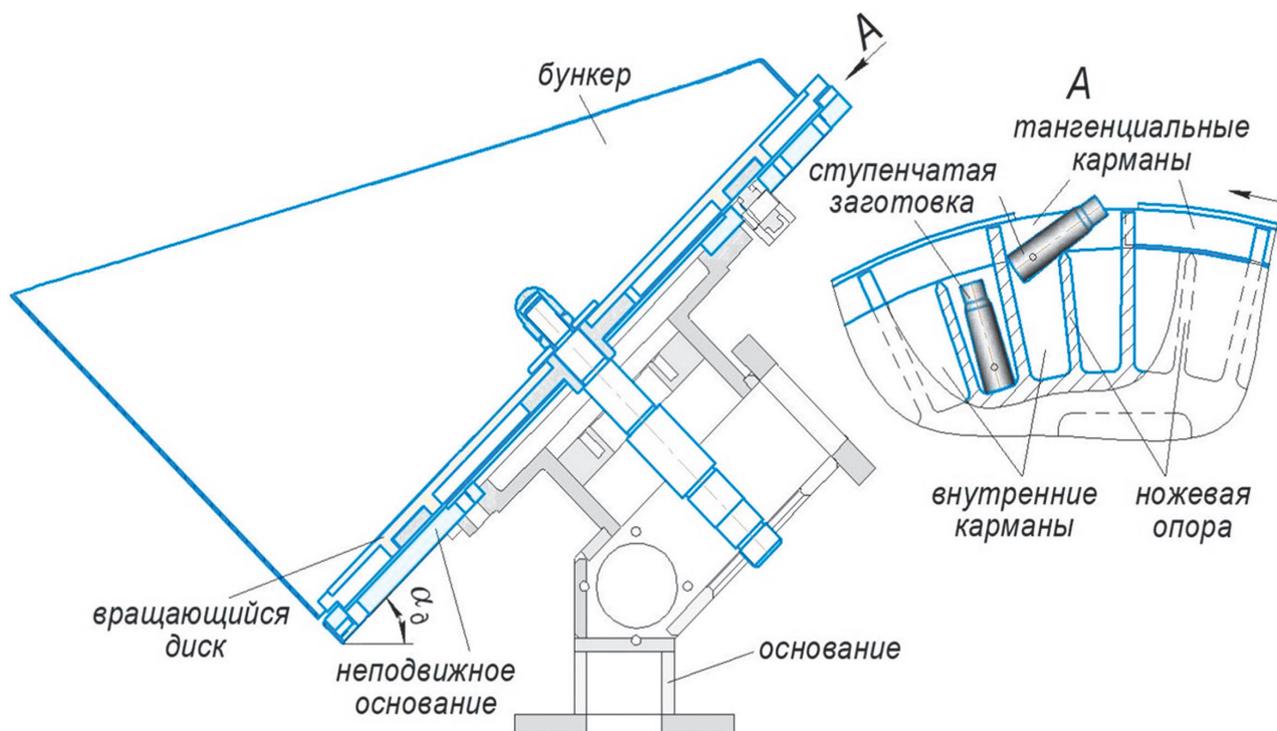


**Рис. 1.** Некоторые виды стержневых ступенчатых заготовок и их основные геометрические параметры  
**Fig. 1.** Some types of stepped rod blanks and their basic geometric parameters

В связи с этим использование механических дисковых БЗУ с тангенциально расположенными органами захвата, в которых реализовано активное ориентирование (рис. 2), наиболее целесообразно с точки зрения повышения надежности и производительности БЗУ [16].

В БЗУ данного типа сначала обеспечивается захват заготовок тангенциально расположенными карманами в одном из двух положений, затем захваченные заготовки вращающимся диском направляются в верхнюю часть бункера. В этой зоне на ножевых опорах происходит активное ориентирование заготовок под действием смещения их центра масс так, что в каком бы из двух своих положений не была захвачена заготовка, она в любом случае окажется своим тяжелым торцом в одном из внутренних карманов, разделенных ножевой опорой (см. рис. 1).

Наличие математических моделей вероятности захвата различных стержневых ступенчатых заготовок в БЗУ с тангенциальными карманами на ранних этапах проектирования способствует выбору наиболее оптимальных параметров БЗУ, при которых будут обеспечены надежное функционирование БЗУ и максимальная производительность для каждой конкретной заготовки, что является актуальной задачей.



**Рис. 2.** Механическое дисковое бункерное загрузочно-ориентирующее устройство с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами и принцип его работы при ориентировании заготовок  
**Fig. 2.** Mechanical disk hopper loading and orienting device with a tilted rotating disk and pockets tangentially located along its periphery and its operation principle under workpiece orienting

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью является разработка математической модели вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок тел вращения в механическом дисковом БЗУ с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами, позволяющая теоретически описать влияние на производительность БЗУ его конструктивных и кинематических параметров, геометрических параметров заготовок, коэффициентов трения между ними и учесть уровень заполнения бункера заготовками.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе выполнения работы были проведены теоретические исследования процессов захвата стержневых ступенчатых заготовок с применением математических и компьютерных моделей, построение которых базировалось на методах теории вероятностей, аналитической пространственной геометрии, теоретической механики и общих физических законах.

Математическая модель производительности дискового БЗУ (в независимости от его типа) определяется теоретической или максимально возможной производительностью  $\Pi$  БЗУ и вероятностью  $\eta$  захвата в нем заготовок при минимальном их заполнении бункера БЗУ по формуле:

$$\Pi = \Pi_m \eta = k \cdot n \cdot \eta = \frac{60v}{t} \eta, \quad (1)$$

в которой теоретическая производительность определяется или произведением числа захватывающих органов (карманов)  $k$  и частоты их вращения  $n$ , или отношением окружной карманов  $v$  и их шага  $t$  [16].

Вероятность захвата описывается на основе предложенной в работах [17, 18] концепции в виде выражения:

$$\eta = \eta_{max} \left( 1 - \frac{v^4}{v_{пред}^4} \right), \quad (2)$$

где  $\eta_{max}$  – максимальное значение вероятности захвата (при  $v \rightarrow 0$ ), представляющее собой произведение вероятностей  $p_i$  нахождения заготовок на пути к карману в положении, благоприятном для захвата, и  $p_c$  того, что захвату заготовок не мешает их сцепляемость друг с другом;  $v_{пред}$  – предельное значение окружной скорости, при которой в карман не успеет запасть какая-либо заготовка.

Адекватность предложенной концепции была подтверждена результатами многочисленных экспериментальных исследований [19–22]. Основываясь на данной концепции для описания влияния на производительность БЗУ его конструктивных и кинематических параметров, геометрических параметров заготовок, коэффициентов трения между ними, разработаем математическую модель вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок тел вращения в механическом дисковом БЗУ с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами.

Определение всех коэффициентов математической модели производительности, представленной выражениями (1) и (2), при захвате стержневых ступенчатых заготовок в механическом дисковом БЗУ с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами осуществляется в следующей последовательности.

Вероятность  $p_i$  определяют все поверхности заготовок, из которых возможен их захват тангенциальным карманом, и участок зоны захвата, на котором располагаются заготовки. Вероятность  $p_c$  определяется площадью всех возможных пар сопрягаемых поверхностей заготовок и возможностью их сочетания без разъединения. Это в совокупности позволит определить максимальное значение вероятности захвата  $\eta_{max}$ . Предельное значение окружной скорости  $v_{пред}$  определяется исходя из гипотезы, заключающейся в том, что  $\eta = 0$  тогда, когда сообщенная заготовке движущимся карманом кинетическая энергия достаточна для ее выброса из кармана на некоторую высоту, определяемую конструкцией БЗУ [16].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.

Используя предложенную концепцию, определим для одного из видов стержневых ступенчатых заготовок каждый из параметров, что в совокупности позволит получить математическую модель вероятности захвата и производительности наклонного дискового БЗУ с тангенциальными карманами.

При определении вероятности  $p_i$  исходим из предположения, что для рассматриваемого БЗУ захват заготовок осуществляется при их нахождении на боковых поверхностях III и IV, имеющих общую длину  $l$ . Поэтому заготовка должна располагаться на вращающемся диске и повернуться к карману именно этими поверхностями. На рис. 3 приведены расчетные схемы для определения данной вероятности.

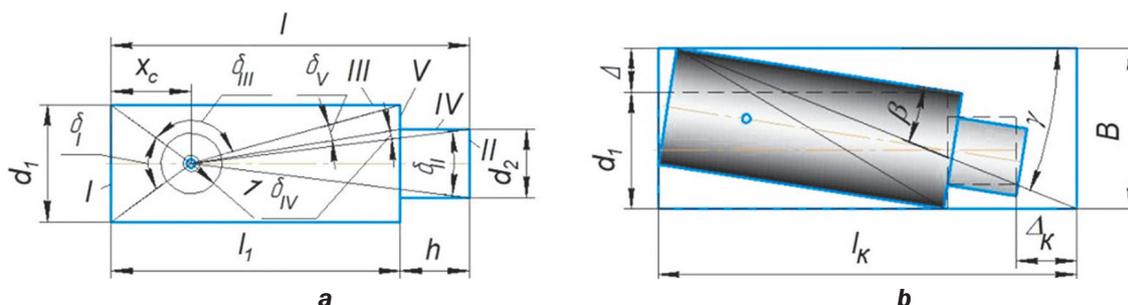


Рис. 3. Расчетные схемы для определения вероятности  $p_i$

Fig. 3. Analytical models for determining  $p_i$  probability

В работе [18] для каждой из поверхностей заготовки, имеющей неявную асимметрию, было рассмотрено определение вероятностей того, что засыпанные в бункер заготовки после падения окажутся на вращающемся диске любой из своих сторон. Так как заготовки имели неявную асимметрию, при которой диаметры торцов отличаются друг от друга несущественно (на 10–40%), то было принято допущение – боковую поверхность принимать единой, т.е.  $p_{III} = 1 - (p_I + p_{II})$ . Для заготовок, у которых отличие более 40%, вероятность нахождения заготовки в благоприятном для захвата положении на поверхности диска будет определяться по формуле:  $p_{\Sigma} = p_{III} + p_{IV} = 1 - (p_I + p_{II} + p_V)$ . Каждая из вероятностей будет определяться углами  $\delta_I, \delta_{II}, \delta_{III}, \delta_{IV}, \delta_V$  с помощью расчетной схемы (см. рис. 3 а), а соответствующие им вероятности каждой из поверхностей ступенчатой заготовки по формулам:

$$p_I = 0,5[1 - \cos(0,5\delta_I)]; \quad p_{II} = 0,5[1 - \cos(0,5\delta_{II})]; \quad p_{III} = 0,5[1 - \cos(0,5\delta_{III})]; \\ p_{IV} = 0,5[1 - \cos(0,5\delta_{IV})]; \quad p_V = 0,5[1 - \cos(0,5\delta_V)].$$

После этого необходимо определить максимальное  $p_{i \max}$  и минимальное  $p_{i \min}$  значения вероятности  $p_i$ , соответствующие участкам зоны захвата, где заготовки располагаются разрозненно в один и несколько слоев. В рассматриваемом БЗУ с тангенциальными карманами и активным ориентированием, соответственно, с использованием расчетных схем (см. рис. 3 а, б) получим:

$$p_{i \max} = \frac{p_{III}}{\pi} (\delta_{III} + \delta_{IV} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha_{\partial}}), \quad p_{i \min} = \frac{p_{III}}{\pi} (\gamma - \beta),$$

где  $\mu$  – коэффициент трения между заготовками и вращающимся диском;  $\alpha_{\partial}$  – угол наклона вращающегося диска, рад (см. рис. 2);  $\gamma, \beta$  – углы, определяемые с помощью расчетной схемы (см. рис. 3 б), рад.

Тогда вероятность  $p_i$  определится по формуле:  $p_i = 1 - (1 - p_{i \max})^3 (1 - p_{i \min})^k$  или

$$p_i = 1 - \left[ 1 - \frac{p_{III}}{\pi} (\delta_{III} + \delta_{IV} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha_{\partial}}) \right]^3 \left[ 1 - \frac{p_{III}}{\pi} (\gamma - \beta) \right]^k, \quad (3)$$

где  $k$  – число заготовок, которое может разместиться в зоне расположения карманов, определяемой с помощью системы линейных уравнений, полученных при анализе граничных условий процесса захвата.

Для определения вероятности  $p_c$  определяются площади всех поверхностей заготовки, а затем рассматриваются все возможные пары их сопряжений; при этом учитываются сопряжения только тех поверхностей заготовок, которые возможно сочетать без разъединения, что характеризуется углом  $\xi$ . Данный угол показывает свободу перемещения для каждой пары сопрягаемых поверхностей заготовки в плоскостях  $x$  и  $y$  и учитывает влияние коэффициентов трения  $p_c$  заготовок друг с другом.

Вероятность  $p_c$  в математической модели вероятности захвата позволяет учесть влияние на производительность БЗУ взаимосцепляемости заготовок при захвате и определяется по выражению:

$$p_c = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot n \cdot (F_I + F_{II} + \dots + F_V)} \sum_{i=1}^{n^2} \left[ \left\{ \sqrt{\xi_{xi}^2 + \xi_{yi}^2} \right\}_{I-II} \times (F_I + F_{II})_i + \dots \right], \quad (4)$$

где  $n$  – количество поверхностей заготовки ( $n = 5$  для ступенчатых заготовок) и число  $n^2$  их сочетаний;  $F_I, F_{II}, \dots, F_V$  – площади всех поверхностей заготовки,  $m^2$ ;  $\xi_{xi}, \xi_{yi}$  – углы возможного поворота двух соприкасающихся поверхностей с площадями  $F_I$  и  $F_{II}$  без отрыва по плоскостям  $x$  и  $y$ , соответственно (рис. 4), на примере варианта соприкосновения I-II (аналогично записываются выражения для каждой пары всех соприкасающихся поверхностей, в данном случае еще 24).

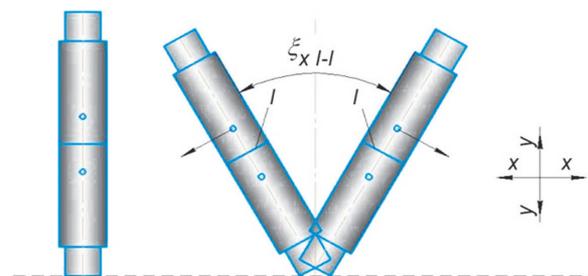


Рис. 4. Расчетная схема определения углов  $\xi_{xi}$ ,  $\xi_{yi}$  возможного поворота двух соприкасающихся поверхностей двух заготовок на примере сочетания I-I

Fig. 4. Analytical model for determining  $\xi_{xi}$ ,  $\xi_{yi}$  angles of possible rotation of two contacting surfaces of two workpieces on the example of I-I combination

Предельное значение окружной скорости  $v_{пред}$  определяется из условий движения катящейся по направлению к движущемуся карману заготовки по поверхности вращающегося диска по формуле, представленной в работе [16]:

$$v_{пред} = \Delta_K \sqrt{\frac{mgd_1^2 \sin \alpha_{\partial}}{2\Delta h(md_1^2 + 4J_u)}}, \tag{5}$$

где  $\Delta_K$  – зазор между стенкой кармана и заготовкой, м;  $m$  – масса заготовки, кг;  $\Delta h$  – глубина кармана, на которую должна запасть заготовка, чтобы ее не выбросило из кармана, м;  $J_u$  – момент инерции центра масс заготовки относительно центра качения, кг·м<sup>2</sup> (рис. 5).

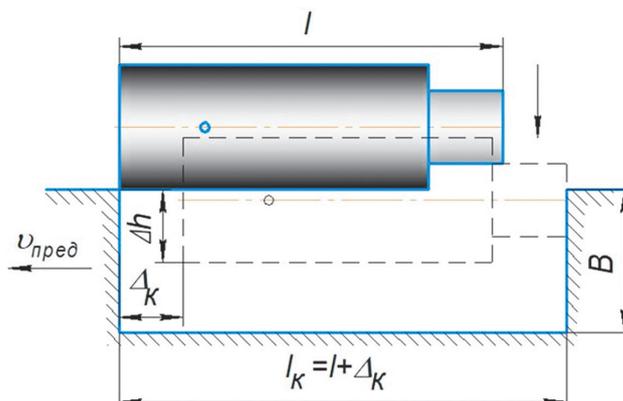


Рис. 5. Расчетная схема для определения  $v_{пред}$

Fig. 5. Analytical model for determining  $v_{пред}$

Тогда математическая модель производительности механического дискового БЗУ с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами для стержневых ступенчатых заготовок с использованием выражений (1)–(5) и после выполнения преобразований будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{60v}{t} \left[ 1 - \left[ 1 - \frac{\rho_{III}}{\pi} (\delta_{III} + \delta_{IV} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha_{\partial}}) \right]^3 \left[ 1 - \frac{\rho_{III}}{\pi} (\gamma - \beta) \right]^k \right] \times \\ & \times \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot n \cdot (F_I + F_{II} + \dots + F_V)} \sum_{i=1}^{n^2} \left[ \left\{ \sqrt{\xi_{xi}^2 + \xi_{yi}^2} \right\}_{I-II} \times (F_I + F_{II})_i + \dots \right]_i \right] \times \\ & \times \left( 1 - \frac{v^4 \cdot 4(\Delta h(md_1^2 + 4J_u))^2}{\Delta_K^4 (mgd_1^2 \sin \alpha_{\partial})^2} \right). \end{aligned} \tag{6}$$

Разработанная математическая модель включает параметры БЗУ и загружаемых заготовок, что позволяет выбрать оптимальные параметры БЗУ для обеспечения требуемых значений производительности.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработанная математическая модель вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок тел вращения в механическом дисковом БЗУ с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами позволяет определить диапазоны фактической производительности данного БЗУ и выявить значения его параметров, при которых будут обеспечены ее требуемые значения. Данная модель представляет собой совокупность математических зависимостей, позволяющих описать влияние на производительность конструктивных и кинематических параметров БЗУ, геометрических параметров загружаемых заготовок, учесть коэффициент трения материалов, из которых они изготовлены. Наличие таких моделей на ранних этапах проектирования существенно сокращает материальные и временные затраты, позволяет оптимизировать процесс автоматической загрузки, обеспечить его эффективность в целом.

## **Список источников**

1. Sandier B.Z. Robotics: designing the mechanisms for automated machinery. 2nd ed. San Diego, California: ACADEMIC PRESS, 1999. 433 p.
2. Chua P. E-learning of automated parts feeding // Assembly Automation. 2006. Vol. 26. No. 4. P. 323–334. <https://doi.org/10.1108/01445150610705245>.
3. Преис В.В. Надежность автоматических роторно-конвейерных линий для сборки многоэлементных изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2003. № 10. С. 17–22. EDN: WOWBKP.
4. Пантюхина Е.В., Васин С.А., Пантюхин О.В. Обеспечение надежного ориентирования асимметричных деталей формы тел вращения в дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. № 1. С. 132–142. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-132-142>. EDN: BWQJWT.
5. Преис В.В. Прогнозирование надежности автоматической сборочной линии с учетом потерь комплектующих элементов при сборке многоэлементных изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2024. № 4. С. 153–156. <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2024-25-4-153-156>. EDN: JKLCFQ.
6. Преис В.В. Моделирование надежности резервированных роторных систем автоматической загрузки штучных предметов обработки // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. 2022. № 2. С. 52–62. EDN: LHXCUI.
7. Хачатурян А.В., Преис В.В. Теоретическая и экспериментальная оценка времени пассивного ориентирования штучных деталей, асимметричных по торцам, в механическом зубчатом бункерном загрузочном устройстве // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 6. С. 303–312. EDN: BHDDHC.
8. Дьякова Э.В. Современные концепции теорий математического моделирования производительности механических дисковых бункерных загрузочных устройств // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 4. С. 58–62. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-4-58-62>. EDN: ZOSIKV.
9. Лукин С.А. Математическая модель вероятности захвата стержневых заготовок в форме колпачка в бункерном загрузочном устройстве с зубьями и регулируемым ориентатором // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 3–10. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-8-3-4>. EDN: QFNVNS.
10. Pantuykhina E.V., Preis V.V., Pantuykhin O.V. Passive orientation of the parts in the mechanical disk hopper feeding device with an annular orientator and radial grooves // Journal of Physics: IOP Conference Series. 2021. Vol. 1791. P. 012105. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1791/1/012105>. EDN: RLMQHB.
11. Пузиков И.В. Трехмерный визуальный анализ производительности вертикального бункерного загрузочного устройства с роликами для ступенчатых трехсоставных колпачков типа push-pull // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 5. С. 17–21. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-5-17-21>. EDN: HMBKSJ.
12. Boothroyd G. Assembly automation and product design. Boca Raton: CRC Press, 2005. 536 p. <https://doi.org/10.1201/9781420027358>.
13. Ghosh S., Singh S.P. Assembly line – theory and practice. Rijeka: Intech Europe, 2011. 264 p. <https://doi.org/10.5772/824>.
14. Дьякова Э.В., Пузиков И.В. Алгоритм расчета и проектирования бункерных загрузочных устройств для деталей формы тел вращения с асимметрией по торцам // Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. <https://ipolytech.elpub.ru>

- В.Г. Шухова, посвящ. 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова (г. Белгород, 16–17 мая 2023 г.). Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 133–137. Т. 12. EDN: IRXELZ.
15. Преис В.В., Хачатурян А.В. Конструирование и расчет механических зубчатых бункерных загрузочных устройств с кольцевым ориентатором // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 10. С. 449–455. <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2020-21-10-449-455>. EDN: MWHAWX.
16. Бляхеров И.С., Преис В.В., Усенко Н.А. Автоматизация загрузки прессов штучными заготовками. М.: Машиностроение, 1975. 280 с. EDN: UCWMWL.
17. Pantyukhina E.V. Integrated approach methodology for evaluating the feed rate of mechanical disk hopper-feeding devices // Journal of Physics: IOP Conference Series. 2020. Vol. 1546. P. 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1546/1/012024>. EDN: VHFAPW.
18. Васин С.А., Пантюхина Е.В. Методика определения вероятности захвата асимметричных деталей формы тел вращения в дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2023. № 3. С. 64–88. <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-3-64-88>. EDN: CUEBFL.
19. Pantyukhina E.V., Preis V.V., Puzikov I.V., Dyakova E.V. Results of a theoretical and experimental research of a vertical hopper feeding device with rollers for flat and close-to-equal-sized parts with implicit asymmetry // Journal of Physics: IOP Conference Series. 2021. Vol. 1901. P. 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1901/1/012017>. EDN: ZGMMIC.
20. Pantyukhina E.V., Preis V.V., Khachaturian A.V. Feed rate evaluation of mechanical toothed hopper-feeding device with ring orientator for parts, asymmetric at the ends // Journal of Physics: IOP Conference Series. 2019. Vol. 1260. P. 032032. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/3/032032>. EDN: VJQPIJ.
21. Дьякова Э.В. Теоретическое и экспериментальное исследование производительности усовершенствованного бункерного загрузочного устройства для полуфабрикатов двухстороннего выдавливания // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2024. № 26. С. 86–94. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-86-94>. EDN: UZUXDG.
22. Хачатурян А.В., Преис В.В., Токарев В.Ю. Экспериментальные исследования производительности зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором для пустотелых деталей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 5. С. 28–35. EDN: ZXMHXV.

#### References

1. Sandier B.Z. *Robotics: designing the mechanisms for automated machinery*. 2nd ed. San Diego, California: ACADEMIC PRESS; 1999, 433 p.
2. Chua P. E-learning of automated parts feeding. *Assembly Automation*. 2006;26(4):323-334. <https://doi.org/10.1108/01445150610705245>.
3. Preis V.V. Reliability of automatic rotary conveyor lines for multi-element product assembly. *Assembly in mechanical engineering, instrumentation*. 2003;10:17-22. (In Russ.). EDN: WOWBKP.
4. Pantyukhina E.V., Vasin S.A., Pantyukhin O.V. Ensuring a reliable orientation of asymmetric parts of the form of rotation bodies in disk hopper feeding and orienting devices. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2024;22(1):132-142. (In Russ.). <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-132-142>.
5. Preis V.V. Forecasting automatic assembly line reliability considering element losses during assembly of multi-element products. *Assembly in mechanical engineering, instrumentation*. 2024;4:153-156. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2024-25-4-153-156>. EDN: JKLCFQ.
6. Preis V.V. Simulation of reliability of redundant rotor feeding systems of piece processing items. *Avtomatizaciya i izmereniya v mashino-priborostroenii*. 2022;2:52-62. (In Russ.). EDN: LHXCUU.
7. Khachaturyan A.V., Preis V.V. Theoretical and experimental estimation of passive time orientation of piece parts, asymmetric at the ends, in the mechanical toothed hopper feeding device. *Proceedings of the Tula State University*. 2019;6:303-312. (In Russ.). EDN: BHDDHC.
8. Diakova E.V. Modern concepts of theories of mathematical modeling of performance of mechanical disk hopper-feeder devices. *Proceedings of the Tula State University*. 2021;4:58-62. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-4-58-62>. EDN: ZOSIKV.
9. Lukin S.A. Mathematical model of probability of gripping rod blanks in form of cap in hopper feeder with teeth and adjustable orientator. *Proceedings of the Tula State University*. 2024;8:3-10. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-8-3-4>. EDN: QFNVNS.
10. Pantyukhina E.V., Preis V.V., Pantyukhin O.V. Passive orientation of the parts in the mechanical disk hopper feeding device with an annular orientator and radial grooves. *Journal of Physics: IOP Conference Series*. 2021;1791:012105. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1791/1/012105>. EDN: RLMQHB.
11. Puzikov I.V. Three-dimensional visual performance analysis vertical hopper feeding device with rollers for stepped three-part push-pull caps. *Proceedings of the Tula State University*. 2021;5:17-21. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-5-17-21>. EDN: HMBKSJ.
12. Boothroyd G. *Assembly automation and product design*. Boca Raton: CRC Press; 2005, 536 p. <https://doi.org/10.1201/9781420027358>.
13. Ghosh S., Singh S.P. *Assembly line – theory and practice*. Rijeka: Intech Europe; 2011, 264 p. <https://doi.org/10.5772/824>.

14. Diakova E.V., Puzikov I.V. Algorithm for calculating and designing hopper loading devices for parts of the revolution body shape with asymmetry along the ends. In: *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya molodyh uchenykh BGTU im. V.G. Shuhova, posvyashchen-naya 170-letiyu so dnya rozhdeniya V.G. Shuhova = International scientific and technical conference of young scientists of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov dedicated to the 170<sup>th</sup> birth anniversary of V.G. Shukhov*. 16–17 May 2023, Belgorod. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; 2023, vol. 12, p. 133-137. (In Russ.). EDN: IRXELZ.
15. Preys V.V., Khachaturian A.V. Design and calculation of mechanical toothed hopper feeding devices with a ring orientator. *Assembly in mechanical engineering, instrumentation*. 2020;10:449-455. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2020-21-10-449-455>. EDN: MWHAWX.
16. Blakherov I.S., Preis V.V., Usenko N.A. *Automation of loading of presses by piece blanks*. Moscow: Mashinostroenie; 1975, 280 p. (In Russ.). EDN: UCWMWL.
17. Pantuykhina E.V. Integrated approach methodology for evaluating the feed rate of mechanical disk hopper-feeding devices. *Journal of Physics: IOP Conference Series*. 2020;1546:012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1546/1/012024>. EDN: BHFAPW.
18. Vasin S.A., Pantuykhina E.V. Method for determining probability of capturing the asymmetric parts with the rotation body shape in the disk hopper loading-orientation devices. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*. 2023;3:64-88. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-3-64-88>. EDN: CUEBFL.
19. Pantuykhina E.V., Preis V.V., Puzikov I.V., Dyakova E.V. Results of a theoretical and experimental research of a vertical hopper feeding device with rollers for flat and close-to-equal-sized parts with implicit asymmetry. *Journal of Physics: IOP Conference Series*. 2021;1901:012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1901/1/012017>. EDN: ZGMMIC.
20. Pantuykhina E.V., Preis V.V., Khachaturian A.V. Feed rate evaluation of mechanical toothed hopper-feeding device with ring orientator for parts, asymmetric at the ends. *Journal of Physics: IOP Conference Series*. 2019;1260:032032. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/3/032032>. EDN: BJQPIJ.
21. Diakova E.V. Theoretical and experimental study of the performance of an improved hopper feeding device for semi-finished products of double-sided extrusion. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2024;26:86-94. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-86-94>. EDN: UZUXDG.
22. Khachaturian A.V., Preis V.V., Tokarev V.Yu. Experimental research of the productivity of a toothed hopper feeding device with the ring orientator for hollow parts. *Proceedings of the Tula State University*. 2019;5:28-35. (In Russ.). EDN: ZXMHXV.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Пантюхина Елена Викторовна,**

Д.Т.Н., доцент,  
доцент кафедры «Промышленная  
автоматика и робототехника»,  
Тульский государственный университет,  
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, Россия  
✉ e.v.pant@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0200-7321>

**Борисов Александр Александрович,**

заместитель начальника отдела,  
начальник лаборатории научно-исследовательского  
испытательного отдела,  
3-й Центральный научно-исследовательский институт  
Министерства обороны Российской Федерации,  
606081, Нижегородская область,  
пос. Смолино, Россия  
[boris912@mail.ru](mailto:boris912@mail.ru)

**Васин Сергей Александрович,**

Д.Т.Н., профессор,  
профессор-консультант кафедры  
«Технология машиностроения»,  
Тульский государственный университет,  
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, Россия  
[vasin\\_sa53@mail.ru](mailto:vasin_sa53@mail.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Elena V. Pantuykhina,**

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department  
of Industrial Automation and Robotics,  
Tula State University,  
92, Lenin pr., Tula 300012, Russia  
✉ e.v.pant@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0200-7321>

**Alexander A. Borisov,**

Deputy Head of the Department,  
Head of the Laboratory of the Research  
and Testing Department, 3<sup>rd</sup> Central Research  
Institute of the Ministry of Defense of the  
Russian Federation, Smolino village, Nizhny  
Novgorod Region 606081, Russia  
[boris912@mail.ru](mailto:boris912@mail.ru)

**Sergey A. Vasin,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor-Consultant of the Department  
of Mechanical Engineering Technology,  
Tula State University,  
92, Lenin pr., Tula 300012, Russia  
[vasin\\_sa53@mail.ru](mailto:vasin_sa53@mail.ru)

**Клентак Анна Сергеевна,**

к.т.н., доцент,  
доцент кафедры «Теплотехника  
и тепловые двигатели»,  
Самарский национальный исследовательский  
университет имени академика С.П. Королёва,  
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, Россия  
anna\_klentak@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6311-1769>

**Anna S. Klentak,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department  
of Heat Engineering and Heat Engines,  
Samara National Research University  
named after Academician S.P. Korolev,  
34 Moskovskoye shosse, Samara 443086, Russia  
anna\_klentak@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6311-1769>

**Заявленный 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 01.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 15.11.2024 г.; принята к публикации 18.11.2024 г.

**Authors' contribution**

The authors contributed equally to the article.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

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

**Information about the article**

The article was submitted 01.10.2024; approved after reviewing 15.11.2024; accepted for publication 18.11.2024.



## Влияние направления печати по FDM-технологии на механические свойства изделия

В.Б. Распопина<sup>1✉</sup>, В.В. Мартынова<sup>2</sup>, Е.А. Ступина<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель работы – изучение влияния направления печати в FDM-технологии (от англ. Fused Deposition Modelling – моделирование методом послойного наплавления) на механические свойства изделия. Лабораторные испытания образцов типа В проводились в соответствии с ГОСТ 11262-2017 на разрывной машине для статических испытаний Shimadzu AGS-10kNXD со скоростью нагружения 2 мм/мин. Образцы были изготовлены из термопластика ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол). При прочих равных условиях изменялось направление печати образцов. В качестве параметра, отображающего этот фактор, был принят угол наклона нитей печати в заполнении внутреннего объема образца  $\alpha$  к продольной оси образца. Результаты испытаний FDM-образцов показали, что при разных углах наклона  $\alpha$  данные экспериментов закономерно меняются. Образец состоит из двух составляющих: первая – это заполнение внутреннего объема образца; вторая – внешняя оболочка образца. По результатам анализа (на 3D-моделях образцов в слайсере) траектории укладки нитей печати в слоях и строения каждого слоя было выявлено, что на изменение механических характеристик испытываемых образцов оказывают влияние обе составляющие их конструкции. Во внешней оболочке образца оказывают влияние верхняя и нижняя грани оболочки. Детальный анализ модели каждого слоя образцов позволил объяснить изменение реакции образцов с разными  $\alpha$  на действие одинаковой растягивающей нагрузки в части величины разрушающей нагрузки. В частности, особенности структуры заполнения таковы, что ее влияние на величину разрушающей нагрузки будет ограничено ростом угла  $\alpha$  от 0 до 45°. Дальнейшее увеличение  $\alpha$  приводит к зеркальной повторяемости картины. При этом влияние на величину разрушающей нагрузки со стороны внешней оболочки соответствует диапазону  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ . Таким образом, в результате проведенных исследований были получены знания, дающие предпосылки для формирования теории, обуславливающей создание методики изготовления деталей с помощью FDM-технологии с заданными механическими характеристиками.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, FDM-печать, слайсер, образец, испытание на растяжение, механические характеристики, направление печати

**Для цитирования:** Распопина В.Б., Мартынова В.В., Ступина Е.А. Влияние направления печати по FDM-технологии на механические свойства изделия // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 477–487. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-477-487>. EDN: GFOMXF.

### MECHANICAL ENGINEERING

#### Original article

## Effect of FDM printing direction on the mechanical properties of products

Vera B. Raspopina<sup>1✉</sup>, Valentina V. Martynova<sup>2</sup>, Elizaveta A. Stupina<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The study aims to examine the effect of printing direction in the FDM-technology (Fused Deposition Modeling) on the mechanical properties of products. Laboratory tests of type B specimens were conducted in accordance with GOST 11262-2017 using a Shimadzu AGS-10kNXD tensile tester with a loading rate of 2 mm/min. The specimens were made of ABS (acrylonitrile butadiene styrene) thermoplastic. Under otherwise equal conditions, the printing direction of the specimens was changed. As a parameter representing this factor, the study adopted the inclination angle of printing filaments in the infill of the specimen  $\alpha$  to its longitudinal axis. The test results of FDM specimens showed that at different inclination angles  $\alpha$ , a consistent variation in experimental data is observed. The specimen comprises two components: the first is the infill of the specimen; the second is the shell of the specimen. An analysis (based on 3D models of specimens in the slicer) of the filament path in the

layers and the structure of each layer revealed that the mechanical properties of test specimens are affected by both components. In the shell of the specimen, this effect is produced by its upper and lower edges. A detailed analysis of models representing each layer of the specimens helped explain the variation in the response of specimens with different  $\alpha$  to the action of the same tensile load in terms of the magnitude of the failure load. In particular, the features of the infill structure are such that its effect on the magnitude of failure load is limited by an increase in the angle  $\alpha$  from 0 to 45°. A further increase in  $\alpha$  leads to a mirror repeat pattern. In this case, the effect of the shell on the magnitude of the failure load corresponds to the range of  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ . Thus, the conducted research provided insights that can help lay the theoretical groundwork for a procedure for producing FDM parts with specified mechanical properties.

**Keywords:** additive technologies, FDM printing, slicer, sample, tensile testing, mechanical behavior, printing direction

**For citation:** Raspopina V.B., Martynova V.V., Stupina E.A. Effect of FDM printing direction on the mechanical properties of products. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):477-487. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-477-487>. EDN: GFOMXF.

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день аддитивные технологии имеют широкое применение при производстве различного оборудования, деталей машин и приборов авиа- и автомобилестроения [1–4]. Все больше предприятий переходят к промышленному использованию данных технологий, поскольку их применение позволяет снизить себестоимость изделия, сократить сроки его производства без потери качества.

В основе аддитивных технологических процессов лежит принцип послойного «выращивания» детали. Данные процессы обеспечиваются благодаря использованию специального оборудования, именуемому 3D-принтер. По сути, это станок с числовым программным управлением (ЧПУ), поскольку печать изделия производится в соответствии с управляющей программой. Программа формируется в соответствии с 3D-моделью изделия.

Одним из наиболее доступных и распространенных методов 3D-печати является FDM-печать (Fused Deposition Modelling – моделирование методом послойного наплавления). В ее основе лежит метод экструзии материала, адаптированный к принципам 3D-печати. Данная печать обеспечивается непрерывной подачей на стол 3D-принтера разогретого материала через движущееся сопло экструдера по запрограммированной траектории. Поскольку диаметр сопла незначительный, выдавливаемый материал образует упорядоченную нитевидную структуру, которая укладывается послойно. Результатом этого процесса является изготавливаемое изделие.

Расходным материалом для FDM-печати являются термопластичные материалы.

Они обладают способностью при нагревании обратимо переходить в вязкотекучее состояние. В настоящее время существует большое разнообразие термопластиков, предназначенных для FDM-печати в промышленных условиях [5–7]. Причем механические свойства ряда из них сопоставимы со свойствами некоторых металлов. Например, предел прочности на растяжение ULTEM 9085 составляет порядка 70 МПа, PEEK – порядка 100 МПа. Применение таких материалов для FDM-печати позволяет заменить часть металлических деталей на детали из термопластиков без потери их механических свойств, позволив существенно оптимизировать производственные циклы. Однако на этом пути присутствуют некоторые трудности.

Качество напечатанного FDM-изделия во многом зависит от сочетания свойств термопластика и настроек печати [8–10]. В данном случае под настройками печати понимаются температурный режим, скорость и объем подачи материала, толщина слоя, расстояние между укладываемыми нитями и прочее. Обладая соответствующими знаниями о свойствах материала и технических характеристиках оборудования, оператор принтера способен обеспечить требуемый от него уровень качества изделия. Для производства несущих деталей этого достаточно.

Изготовление деталей, которые в процессе эксплуатации должны воспринимать нагрузку, требует тщательной проработки изделия на этапе проектно-конструкторских работ [11–13]. Значимую часть таких работ занимает анализ прочности проектируемого изделия [14]. В случае FDM-изделия знаний физико-механических свойств материала недостаточно.

## ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Внешняя геометрия объемного изделия, выполненного методом FDM-печати, определяется оболочкой (рис. 1). Внутренний объем изделия заполняется нитевидной структурой. При одинаковой геометрической форме изделия и заданном шаблоне печати могут отличаться процент внутреннего заполнения и направление заполняющей нити (рис. 2). Безусловно, при прочих равных параметрах печати эти факторы будут влиять на прочность и жесткость изделия.

Методики анализа прочности, применяемые для деталей, изготавливаемых по традиционным технологиям (субтрактивные технологии, формообразующие технологии), неприменимы в данном случае. Причиной этому является то, что в их основе лежит гипотеза сплошности материала. Структура FDM-изделия абсолютно несплошная (см. рис. 2). Гипотеза сплошности материала действует только в пределах нити печати. В настоящий момент исследователи проводят активную работу по

поиску решений проблемы анализа прочности FDM-изделий [15–19]. Одной из ее составляющих являются экспериментальные исследования [20–22]. Они позволяют получить оценку зависимости механических характеристик FDM-структуры от параметров их печати. Поскольку нормативная база для такого рода экспериментов в настоящий момент отсутствует, исследователи в основном руководствуются стандартами для испытаний пластмасс.

Целью данной работы является экспериментальное определение зависимости параметров прочности и жесткости FDM-структуры от направления действия растягивающей силы.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Руководством для проведения исследования принят ГОСТ 11262-2017<sup>4</sup>, регламентирующий метод испытания на растяжение пластмасс.

Для испытаний был принят стандартный образец типа В (рис. 3).

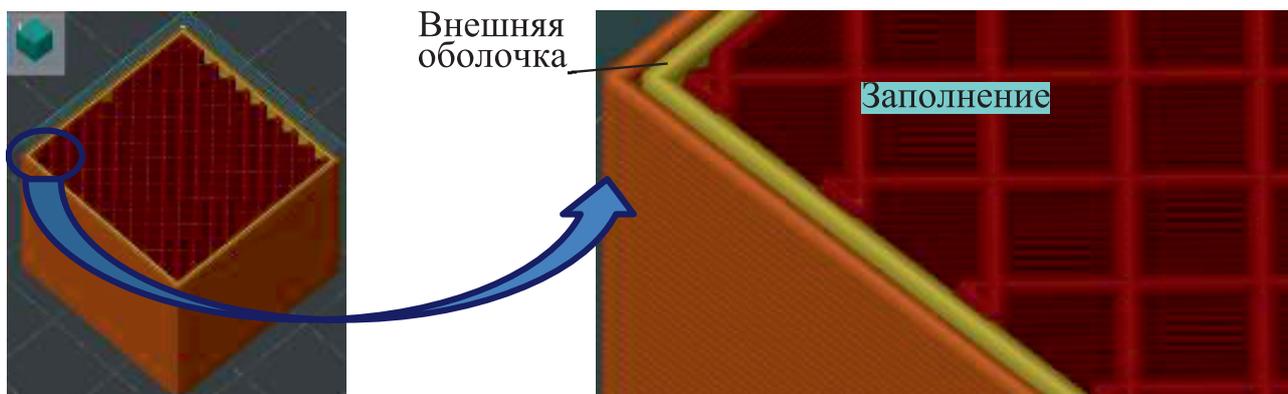


Рис. 1. Внутреннее строение FDM-куба с 45-процентным заполнением по шаблону «сетка»  
Fig. 1. Internal structure of the FDM cube with 45 percent filling according to “grid” pattern

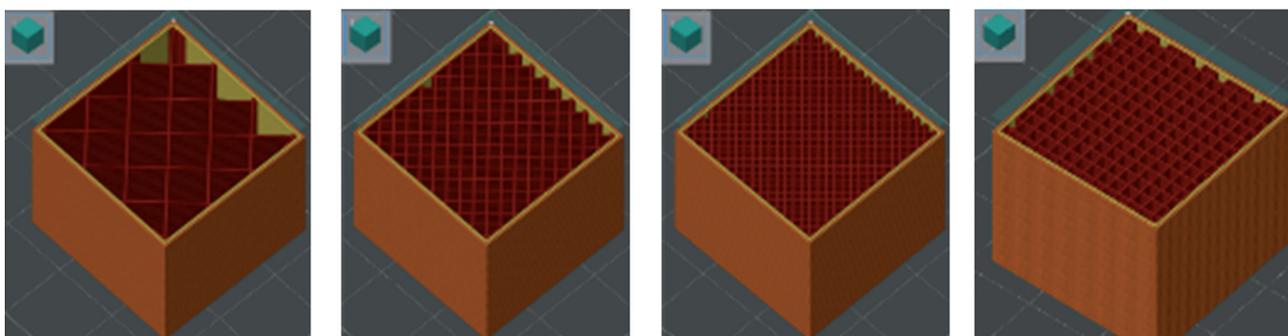
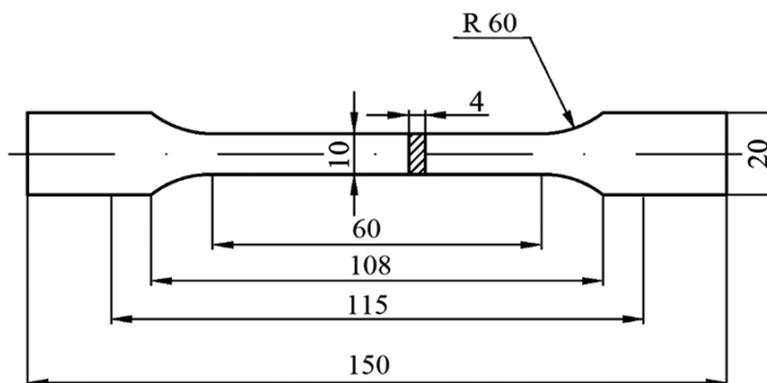


Рис. 2. 3D-модели куба в слайсере OrcaSlicer с различными процентами заполнения и направлениями нити печати  
Fig. 2. Cube 3D models in OrcaSlicer with different filling percentages and printing thread directions

<sup>4</sup>ГОСТ 11262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. Введ. 01.10.2018. М.: Стандартинформ, 2018.



**Рис. 3.** Образец типа В, согласно ГОСТу 11262-2017

**Fig. 3.** Type B sample according to GOST 11262-2017

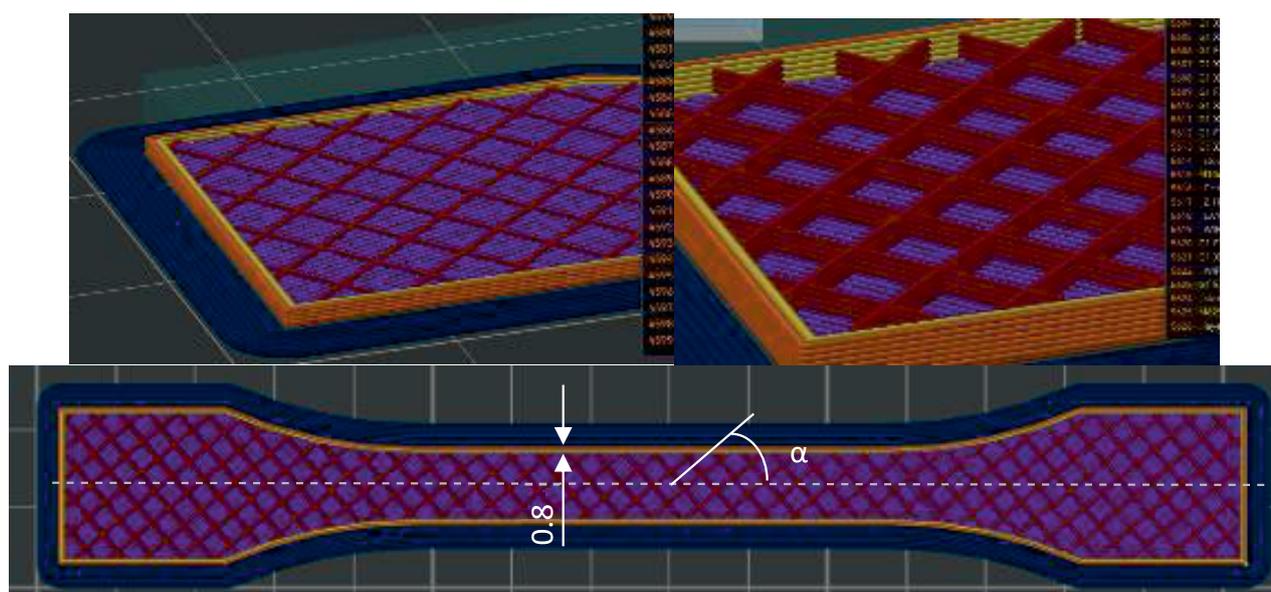
Испытания проводились на разрывной машине для статических испытаний Shimadzu AGS-10kNXD (Shimadzu, Япония) со скоростью нагружения 2 мм/мин.

Образцы были изготовлены из термопластика ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол). Печать образцов осуществлялась на принтере Bambu Lab P1S (Bambu Lab, Китай), диаметр сопла 0,4 мм. При печати образцы расположены плашмя. Параметры печати для всех образцов следующие: скорость печати – 160 мм/с; температура рабочего стола – 90 °С; температура сопла для 1 слоя – 260 °С; для последующих слоев – 270 °С; ширина экструзии 0,4 мм; толщина слоя 0,2 мм. Внутреннее заполнение образцов было выполнено по шаблону заполнения «сетка» с плотностью 25%. Определялся угол наклона

нитей печати  $\alpha$  как угол между нитью и продольной осью образца (рис. 4). Угол изменялся в диапазоне от 0 до 90 ° с шагом 10 °. Структура каждого слоя представляет равномерную сетку с прямоугольными ячейками. Положение каждого прямоугольника от слоя к слою не меняется. Следовательно, слои «прикрепляются» друг к другу не точно, а по всей траектории нити печати слоя.

Логично предположить, что поведение внешне одинаковых образцов под действием одинаковой схемы нагружения при разном наклоне нитей печати будет отличаться.

Направление укладки нитей привязано к одной из двух взаимно перпендикулярных нитей печати заполнения (рис. 5). Предварительный анализ возможного отклика заполнения при разных направлениях нитей пе-



**Рис. 4.** 3D-модель образца в слайсере OrcaSlicer

**Fig. 4.** Sample 3D model in OrcaSlicer

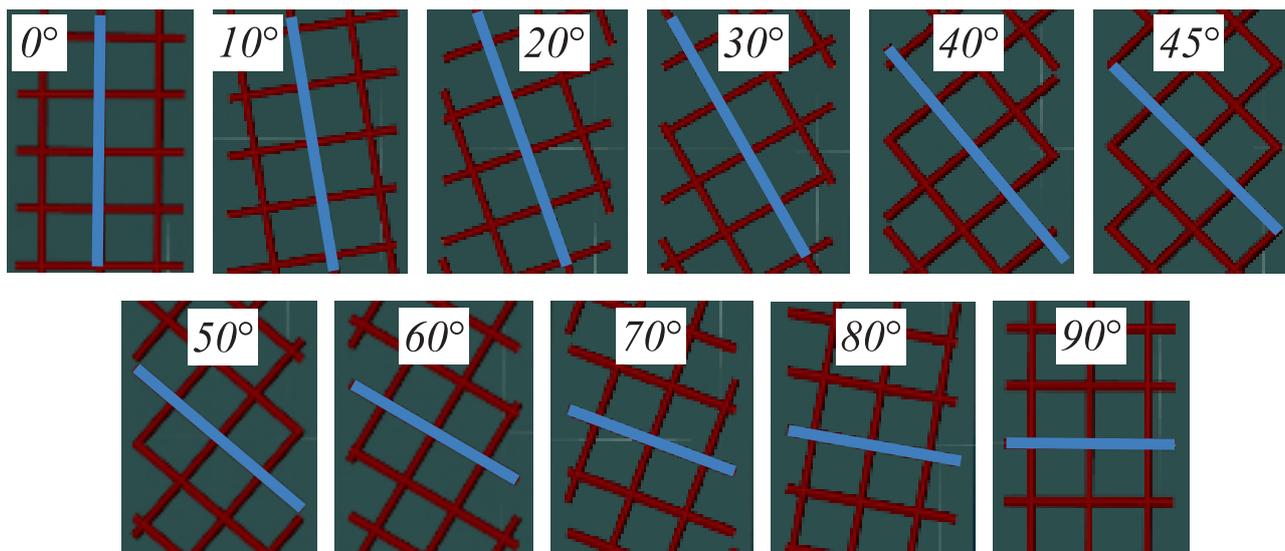


Рис. 5. Углы наклона нитей печати заполнения  
 Fig. 5. Printing thread inclination angles

чати на растягивающую нагрузку позволил предположить, что отличие в отклике должно наблюдаться только в диапазоне углов от 0 до 45°. Когда значение угла наклона переступит порог в 45°, картина должна полностью повториться. Это очевидно, поскольку рассматриваемая нить и перпендикулярная ей нить заменят друг друга в восприятии силового потока.

Чтобы подтвердить или опровергнуть это предположение, было проведено одинад-

цать серий испытаний напечатанных образцов. Каждая серия включает в себя пять образцов с определенным углом наклона нитевидной структуры заполнения (см. рис. 5). В остальном образцы всех серий идентичны.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты испытаний представлены в табл. 1, построен график зависимости максимальной нагрузки  $F_{max}$  от угла наклона нити  $\alpha$  (рис. 6).

Таблица 1. Значения максимальной нагрузки и соответствующих углов наклона нити печати  
 Table 1. Values of maximum load and corresponding inclination angles of the printing thread

$\alpha$ , град	0	10	20	30	40	45	50	60	70	80	90
$F_{max}$ , Н	791,953	789,378	763,141	734,192	692,101	<b>691,223</b>	696,627	699,715	729,140	749,628	806,047

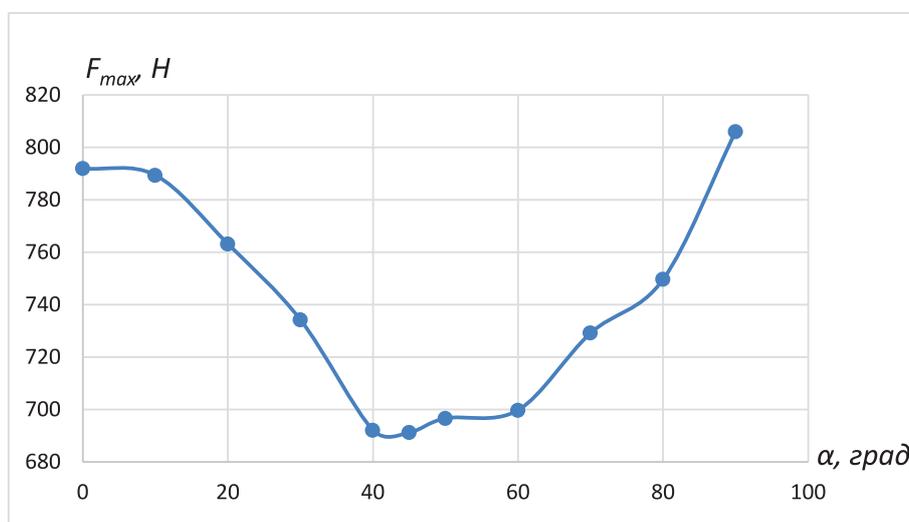


Рис. 6. График зависимости величины максимальной нагрузки от угла наклона нити печати  
 Fig. 6. Maximum load value vs printing thread inclination angle graph

Результаты испытаний показали, что предполагаемой симметричной картины распределения параметров прочности и жесткости не получилось. Поскольку угол  $\alpha = 45^\circ$  является предполагаемым центром симметрии, то за базу для сопоставления результатов испытаний приняты данные этой серии образцов.

Для сопоставления результатов испытаний образцов с углами наклона 0, 45, 90° проведено сравнение (табл. 2): представлены следующие данные об абсолютной и относительной разнице между значениями максимальной нагрузки для образцов с углами наклона нитей печати 0 и 45°, 90 и 45°, 90 и 0° соответственно,  $\Delta_{F_{max}}$ .

**Таблица 2.** Разница между значениями максимальной нагрузки для образцов с углами наклона нитей печати 0 и 45°, 90 и 45°, 90 и 0°

**Table 2.** Difference between the maximum load values for the samples with printing thread inclination angles of 0 and 45°, 90 and 45°, 90 and 0°

$\Delta$	$\Delta_{F_{max}}$ , Н (%)
$\Delta_{0-45^\circ}$	100,730 (14,57)
$\Delta_{90-45^\circ}$	114,824 (16,61)
$\Delta_{90-0^\circ}$	14,094 (1,78)

Из табличных данных следует, что с образцы с углом  $\alpha = 0^\circ$  менее прочные и жесткие по сравнению с образцами с  $\alpha = 90^\circ$ .

Логично предположить, что в промежуточных точках качественная картина должна повториться. Однако график на рис. 6 показывает, что это не так. В табл. 3 представлены аналогичные табл. 2 данные для промежуточных точек.

**Таблица 3.** Разница между значениями максимальной нагрузки для образцов с углами наклона нитей печати в диапазоне от 0 до 90°

**Table 3.** Difference between the maximum load values for the samples with printing thread inclination angles in the range from 0 to 90°

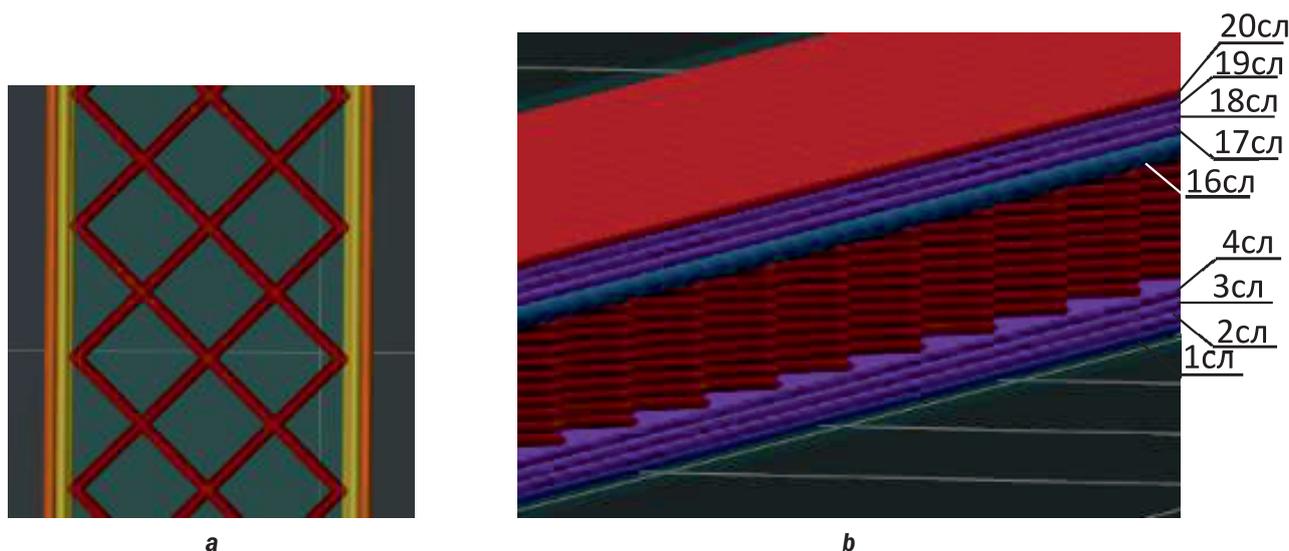
$\Delta$	$\Delta_{F_{max}}$ , Н (%)
$\Delta_{10-45^\circ}$	98,155 (14,2)
$\Delta_{20-45^\circ}$	71,918 (10,40)
$\Delta_{30-45^\circ}$	42,969 (6,216)
$\Delta_{40-45^\circ}$	0,878 (0,127)
$\Delta_{50-45^\circ}$	5,404 (0,782)
$\Delta_{60-45^\circ}$	8,492 (1,229)
$\Delta_{70-45^\circ}$	37,917 (5,48)
$\Delta_{80-45^\circ}$	58,405 (8,450)
$\Delta_{80-10^\circ}$	-39,750 (5,344)
$\Delta_{70-20^\circ}$	-34,001 (4,455)
$\Delta_{60-30^\circ}$	-34,441 (4,920)
$\Delta_{50-40^\circ}$	4,526 (0,007)

Превышение максимальной нагрузки для образцов с  $\alpha$ , равным 10, 20, 30°, значений максимальной нагрузки для соответствующих образцов с  $\alpha$ , равным 80, 70, 60°, составляет порядка 5%. При этом жесткостные характеристики имеют обратную зависимость.

Чтобы понять причину этого, следует проанализировать внутреннее строение образцов. Кроме структуры заполнения образца, на его способность сопротивляться нагрузке влияет внешняя оболочка (рис. 7), которая состоит из стенок или периметра, верхней и нижней оболочек. В данном случае стенки образца внутреннюю картину симметрии не нарушают (см. рис. 7 а). Ее нарушают верхняя и нижняя оболочки образца (см. рис. 7 б). Верхняя оболочка образована пятью слоями, нижняя – четырьмя. Образец в целом образован двадцатью слоями. Сопоставив занимаемый оболочкой объем (4234 мм<sup>3</sup>) и объем всего образца (8092 мм<sup>3</sup>), получаем, что объем оболочки составляет почти половину объема всего образца. Следовательно, в данном случае влияние оболочки на несущую способность образца должно быть значительным.

Следует обратить внимание на слой 16 (см. рис. 7 б). Он является пограничным слоем между заполнением и верхней оболочкой. В терминах FDM-печати его называют внутренним мостом (internal bridge). В OrcaSlicer предусмотрена специальная опция для настройки этого параметра. Функция внутреннего моста – это переход при формировании нитевидной структуры от ее разряженной части в заполнении к верхней оболочке. Как верхняя, так и нижняя оболочки всегда со стопроцентным заполнением. Чтобы обеспечить этот переход, высота внутреннего моста практически в два раза больше высот остальных слоев (см. рис. 7 б). При этом соседний с внутренним мостом слой заполнения (слой 15) практически вплавлен в него (рис. 8).

Траектория укладки нити на внутреннем мосту образует непрерывную ломаную линию с циклически повторяющимся направлением «укладки» звеньев. В пределах одного цикла ломаная состоит из четырех звеньев (рис. 9). Два звена прикрепляются к стенкам образца (звенья 1 и 3). Два других звена (2 и 4) – это две параллельные ли-



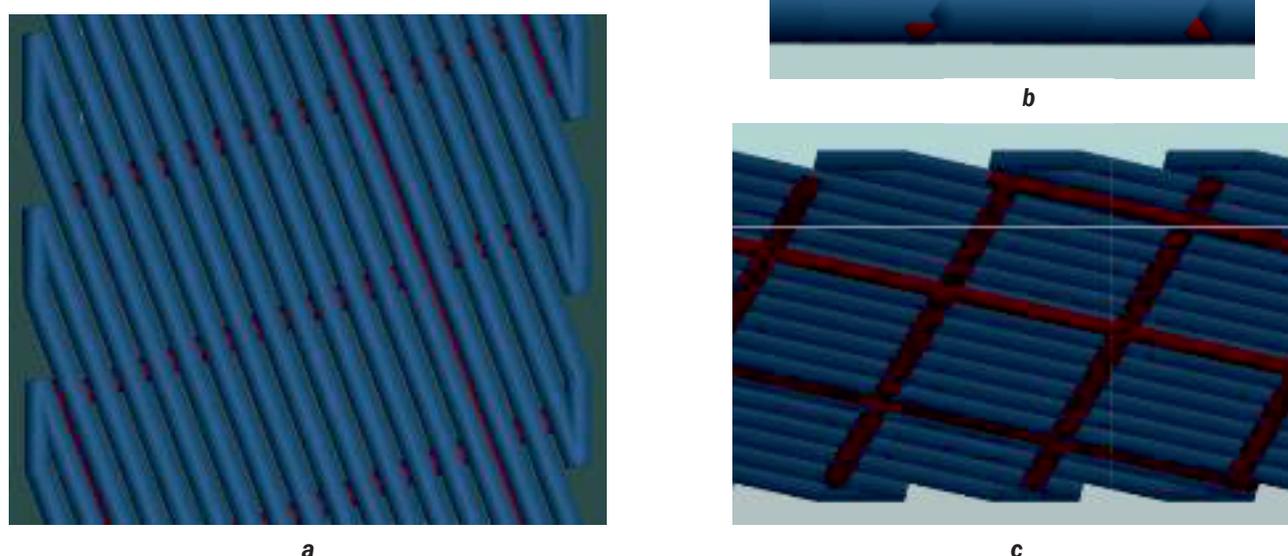
**Рис. 7.** Внутреннее строение образца в рабочей части: а – периметр (стенки) и заполнение; б – верхняя и нижняя оболочки, заполнение

**Fig. 7.** Internal structure of the sample working part: a – perimeter (walls) and filling; b – upper and lower shells, filling

нии, направленные в соответствии с углом  $\alpha$  (см. рис. 5). А именно: если  $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ , то звенья направлены по  $\alpha$ ; если  $50^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ , то звенья направлены по углу  $\alpha + 90^\circ$ . Между нитями, образующими эти звенья, есть небольшой зазор. То есть на нарушение прочностной симметрии (см. рис. 6) этот слой влияния не оказывает.

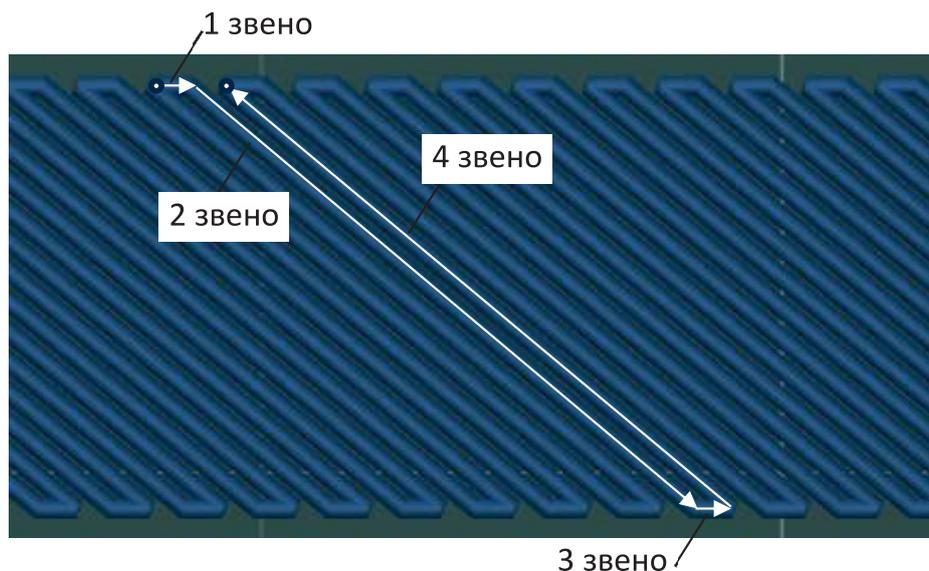
Нарушение в эту симметрию вносит слой 20 (см. рис. 7). Этот слой качественно отличается от прочих. Он образован скре-

пленными между собой по боковым поверхностям отдельными нитями, направленными под углом  $\alpha + 90^\circ$  (рис. 10). Концы каждой нити «стыкуются» с соответствующими нитями периметра. Прочие слои верхней и нижней оболочек формируются по непрерывной траектории также, как внутренний мост (см. рис. 9), с той единственной разницей, что боковые поверхности звеньев 2 и 3 плотно прилегают друг к другу (см. рис. 10). Длина нитей этого слоя изме-

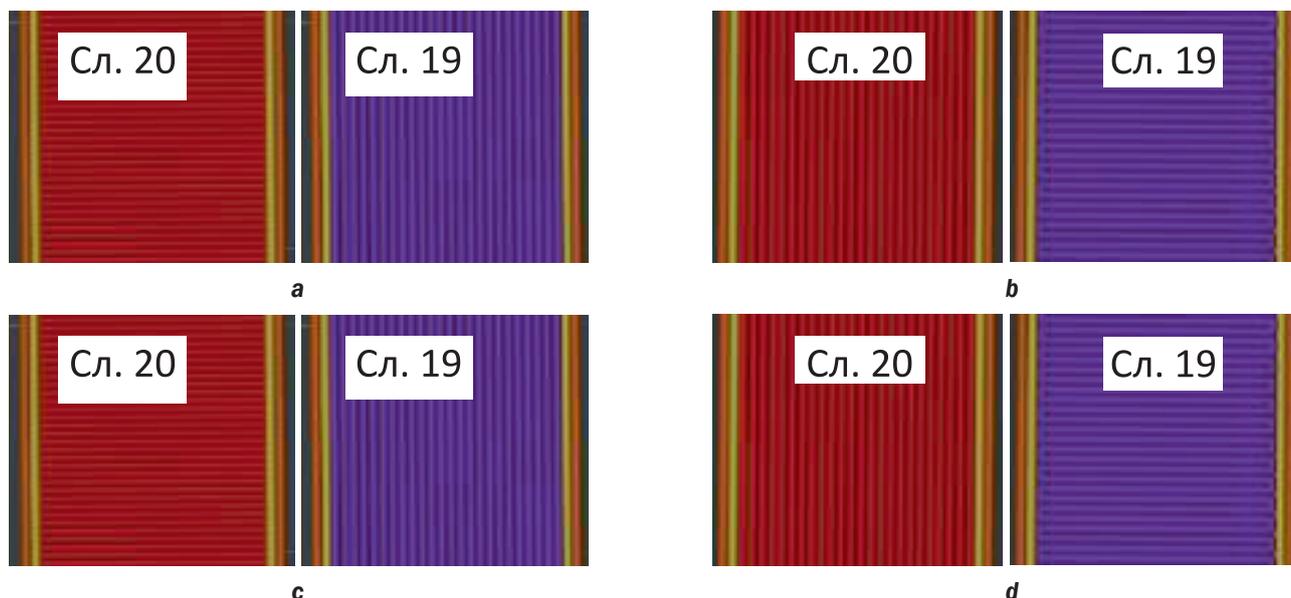


**Рис. 8.** Модель внутреннего моста в OrcaSlicer с примыкающим к нему слоем заполнения в 25%,  $\alpha = 20^\circ$ : а – вид сверху; б – вид сбоку; с – вид со стороны слоя заполнения

**Fig. 8.** Internal bridge model in OrcaSlicer with an adjacent layer of 25% filling,  $\alpha = 20^\circ$ : a – top view; b – side view; c – view from the filling layer



**Рис. 9.** Циклическая нитевидная структура внутреннего моста  
**Fig. 9.** Cyclic thread-like structure of the internal bridge



**Рис. 10.** Модели 19 и 20 слоев образцов с разными углами направления укладки нити: а -  $\alpha = 0^\circ$ ; б -  $\alpha = 90^\circ$ ; в -  $\alpha = 20^\circ$ ; г -  $\alpha = 70^\circ$

**Рис. 10.** Models of 19 and 20 layers of samples with different angles of thread laying directions: а -  $\alpha = 0^\circ$ ; б -  $\alpha = 90^\circ$ ; в -  $\alpha = 20^\circ$ ; г -  $\alpha = 70^\circ$

няется в зависимости от значения угла  $\alpha$ . Очевидно, что способность сопротивляться растягивающей нагрузке у этого слоя образца будет изменяться по всей линейке значений угла  $\alpha$ .

В отличие от 20 слоя, отклик части образца, образованной остальными 19 слоями, изменяется при линейке значений  $\alpha$  только от 0 до  $45^\circ$ . Далее от  $45^\circ$  до  $90^\circ$  реакция этой части образца зеркально повторится.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проделанной работы можно сделать вывод о том, что на параметры прочности образцов при прочих равных условиях влияют два фактора:

- направление укладки нити печати в заполнении;
- направление укладки нити печати в верхней и нижней оболочках образцов.

Причем зависимость между этими факторами непрямоугольная. В заполнении образцов из-

менение значений угла наклона нити печати к продольной оси образца  $\alpha$  от 0 до 90° приводит к некой параболической тенденции в кривой зависимости между значениями максимальной нагрузки, выдерживаемой образцами, и значениями угла  $\alpha$ . Вершина этой параболы находится в точке, у которой  $\alpha = 45^\circ$  (см. рис. 6). Влияние верхней и нижней оболочек образцов вносит возмущение

в эту картину зависимости, нарушает симметрию графика. Для выявления зависимостей, обуславливающих качественные и количественные параметры этого возмущения необходимы дальнейшие исследования.

Данные знания дают предпосылку для возможности получить методику изготовления деталей с заданными механическими характеристиками.

#### Список источников

1. Joch R., Šajgalík M., Drbůl M., Holubják J., Czán A., Bechný V., et al. The application of additive composites technologies for the application of additive composites technologies for // *Materials*. 2023. Vol. 16. Iss. 10. P. 3624. <https://doi.org/10.3390/ma16103624>.
2. Tyrer A. The 3d printing market reaches \$24.8 billion, more from the new proto labs report on 3d printing trends. Режим доступа: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-market-reaches-24-8-billion-more-insights-from-protolabs-new-3d-printing-trend-report-230753/> (дата обращения: 07.04.2024).
3. Tyrer A. Finnair upgrades its Airbus A320 fleet with new 3D printed components. Режим доступа: <https://3dprintingindustry.com/news/finnair-upgrades-its-airbus-a320-fleet-with-new-3d-printed-components-230516/> (дата обращения: 07.04.2024).
4. Petch M. The additive manufacturing advantage: INTERVIEW Tobias Petzinger. Режим доступа: <https://3dprintingindustry.com/news/the-additive-manufacturing-advantage-interview-tobias-petzinger-231081/> (дата обращения: 07.04.2024).
5. Alarifi I.M. A performance evaluation study of 3d printed nylon/glass fiber and nylon/carbon fiber composite materials // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 21. P. 884–892. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.085>.
6. Khosravani M.R., Reinicke T. Mechanical strength of 3D-printed open hole polymer plates // *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 41. P. 664–669. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.05.075>.
7. Озеров А. Высокоэффективные пластики – реальная альтернатива металлам // *iQB technologies* Режим доступа: <https://blog.iqb.ru/high-performance-polymers/> (дата обращения: 07.04.2024).
8. Agarwal K.M., Shubham P., Bhatia D., Sharma P., Vaid H., Vajpeyi R. Analyzing the impact of print parameters on dimensional variation of ABS specimens printed using fused deposition modelling // *Sensors International*. 2022. Vol. 3. P. 100149. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100149>.
9. Tajik A.R., Khan T.I., Parezanović V. Raster angle impact on FDM-based additive manufactured fluidic oscillator // *International Journal of Thermofluids*. 2022. Vol. 16. P. 100230. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100230>.
10. Bayas E., Kumar P., Harne M. Impact of process parameters on mechanical properties of FDM 3d-printed parts: a comprehensive review // *European Chemical Bulletin*. 2023. Vol. 12. Iss. 5. P. 708–725. <https://doi.org/10.48047/ecb/2023.12.si5.073>.
11. Vidakis N., David C., Petousis M., Sigris D., Mountakis N., Moutsopoulou A. The effect of six key process control parameters on the surface roughness, dimensional accuracy, and porosity in material extrusion 3D printing of polylactic acid: Prediction models and optimization supported by robust design analysis // *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2022. Vol. 5. P. 100104. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100104>.
12. D'Addona D.M., Raykar S.J., Singh D., Kramar D. Multi objective optimization of fused deposition modeling process parameters with desirability function // *Procedia CIRP*. 2021. Vol. 99. P. 707–710. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.117>.
13. Сметанников О.Ю., Бекмансуров М.Р., Ильиных Г.В., Донгаузер К.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния в процессе лазерной порошковой наплавки с целью определения конечного коробления изделий // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2023. № 6. С. 124–134. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2023.6.12>.
14. Raja S., Agrawal A.P., Patil P.P., Thimothy P., Capangpangan R.Y., Singhal P., Wotango M.T. Optimization of 3D printing process parameters of polylactic acid filament based on the mechanical test // *International Journal of Chemical Engineering*. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5830869>.
15. Corapi D., Morettini G., Pascoletti G., Zitelli C. Characterization of a polylactic acid (PLA) produced by fused deposition modeling (FDM) technology // *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 24. P. 289–295. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.02.026>.
16. He Feiyang, Alshammari Yo.L.A., Khan M. The effect of printing parameters on crack growth rate of FDM ABS cantilever beam under thermo-mechanical loads // *Procedia Structural Integrity*. 2021. Vol. 34. P. 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.12.009>.
17. Kumar R., Sharma H., Saran C., Tripathy T.S., Sangwan K.S., Herrmann C. A comparative study on the life cycle assessment of a 3D printed product with PLA, ABS & PETG materials // *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 107. P. 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.003>.

18. Birosz M.T., Ledenyák D., Andó M. Effect of FDM infill patterns on mechanical properties // *Polymer Testing*. 2022. Vol. 113. P. 107654. <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2022.107654>.
19. Денискина Г.Ю. CAD/CAM/CAE-система для изготовления конструкций из волокнистых композиционных материалов методом 3D-печати // *Электронный журнал «Труды МАИ»*. 2022. № 126. <https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-21>. EDN: LBGNMV.
20. Ракишев А., Доненбаев Б., Джамалудин Х.Р. Исследование механических характеристик FDM деталей (3D-печати): эмпирические и компьютерные методы // *Наука и техника Казахстана*. 2023. № 3. С. 113–121. <https://doi.org/10.48081/MFBQ8991>.
21. Распопина В.Б., Шеметов Л.И., Стуров А.А. Определение модуля продольной упругости анизотропной FDM-структуры в CAE-среде и с помощью натурального эксперимента // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2024. Т. 20. № 1. С. 8–13. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2024-20-1-8-13>. EDN: ATVTIK.
22. Bechný V., Matuš M., Joch R., Drbúl M., Czán A., Šajgalík M., et al. Influence of the orientation of parts produced by additive manufacturing on mechanical properties // *Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 24. No. 1. P. 2–8. <https://doi.org/10.21062/mft.2024.021>.

### References

1. Joch R., Šajgalík M., Drbúl M., Holubják J., Czán A., Bechný V., et al. The application of additive composites technologies for the application of additive composites technologies for. *Materials*. 2023;16(10):3624. <https://doi.org/10.3390/ma16103624>.
2. Tyrer A. The 3d printing market reaches \$24.8 billion, more from the new proto labs report on 3d printing trends. Available from: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-market-reaches-24-8-billion-more-insights-from-protolabs-new-3d-printing-trend-report-230753/> [Accessed 7th April 2024].
3. Tyrer A. Finnair upgrades its Airbus A320 fleet with new 3D printed components. Available from: <https://3dprintingindustry.com/news/finnair-upgrades-its-airbus-a320-fleet-with-new-3d-printed-components-230516/> [Accessed 7th April 2024].
4. Petch M. The additive manufacturing advantage: INTERVIEW Tobias Petzinger. Available from: <https://3dprintingindustry.com/news/the-additive-manufacturing-advantage-interview-tobias-petzinger-231081/> [Accessed 7th April 2024].
5. Alarifi I.M. A performance evaluation study of 3d printed nylon/glass fiber and nylon/carbon fiber composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;21:884-892. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.085>.
6. Khosravani M.R., Reinicke T. Mechanical strength of 3D-printed open hole polymer plates. *Procedia Structural Integrity*. 2022;41:664-669. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.05.075>.
7. Ozerov A. High-performance plastics - a real alternative to metals. *iQB technologies*. Available from: <https://blog.iqb.ru/high-performance-polymers/> [Accessed 7th April 2024]. (In Russ.).
8. Agarwal K.M., Shubham P., Bhatia D., Sharma P., Vaid H., Vajpeyi R. Analyzing the impact of print parameters on dimensional variation of ABS specimens printed using fused deposition modelling. *Sensors International*. 2022;3:100149. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100149>.
9. Tajik A.R., Khan T.I., Parezanović V. Raster angle impact on FDM-based additive manufactured fluidic oscillator. *International Journal of Thermofluids*. 2022;16:100230. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100230>.
10. Bayas E., Kumar P., Harne M. Impact of process parameters on mechanical properties of FDM 3d-printed parts: a comprehensive review. *European Chemical Bulletin*. 2023;12(5):708-725. <https://doi.org/10.48047/ecb/2023.12.si5.073>.
11. Vidakis N., David C., Petousis M., Sagris D., Mountakis N., Moutsopoulou A. The effect of six key process control parameters on the surface roughness, dimensional accuracy, and porosity in material extrusion 3D printing of polylactic acid: Prediction models and optimization supported by robust design analysis. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2022;5:100104. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100104>.
12. D'Addona D.M., Raykar S.J., Singh D., Kramar D. Multi objective optimization of fused deposition modeling process parameters with desirability function. *Procedia CIRP*. 2021;99:707-710. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.117>.
13. Smetannikov O.Yu., Bekmansurov M.R., Il'inyh G.V., Dongauzer K.A. Modeling tress-strain state under laser powder cladding to determine product final warpage. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Series: Mechanics*. 2023;6:124-134. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2023.6.12>.
14. Raja S., Agrawal A.P., Patil P.P., Thimothy P., Capangpangan R.Y., Singhal P., Wotango M.T. Optimization of 3D printing process parameters of polylactic acid filament based on the mechanical test. *International Journal of Chemical Engineering*. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5830869>.
15. Corapi D., Morettini G., Pascoletti G., Zitelli C. Characterization of a polylactic acid (PLA) produced by fused deposition modeling (FDM) technology. *Procedia Structural Integrity*. 2019;24:289-295. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.02.026>.
16. He Feiyang, Alshammari Yo.L.A., Khan M. The effect of printing parameters on crack growth rate of FDM ABS cantilever beam under thermo-mechanical loads. *Procedia Structural Integrity*. 2021;34:59-64. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.12.009>.

17. Kumar R., Sharma H., Saran C., Tripathy T.S., Sangwan K.S., Herrmann C. A comparative study on the life cycle assessment of a 3D printed product with PLA, ABS & PETG materials. *Procedia CIRP*. 2022;107:15-20. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.003>.
18. Birosz M.T., Ledenyák D., Andó M. Effect of FDM infill patterns on mechanical properties. *Polymer Testing*. 2022;113:107654. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107654>.
19. Deniskina G.Yu. CAD/CAM/CAE system for manufacturing structures from fibrous composite materials using 3D-printing. *Elektronnyj zhurnal "Trudy MAI"*. 2022;126. (In Russ.). <https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-21>. EDN: LBGNMV.
20. Rakishev A., Donenbayev B., Jamaludin K.R. Study of the mechanical characteristics of FDM (3d printed) parts: empirical and computational methods. *Nauka i tekhnika Kazahstana*. 2023;3:113-121. (In Russ.). <https://doi.org/10.48081/MFBQ8991>.
21. Raspopina V.B., Shemetov L.I., Sturov A.A. Determination of the longitudinal elastic modulus of anisotropic FDM structure in CAE environment and using a full-scale experiment. *Strengthening Technologies and coatings*. 2024;20(1):8-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2024-20-1-8-13>. EDN: ATVTIK.
22. Bechný V., Matuš M., Joch R., Drbůl M., Czán A., Šajgalík M., et al. Influence of the orientation of parts produced by additive manufacturing on mechanical properties. *Manufacturing Technology*. 2024;24(1):2-8. (In Russ.). <https://doi.org/10.21062/mft.2024.021>.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Распопина Вера Борисовна,

к.т.н., доцент,  
доцент кафедры самолетостроения и эксплуатации  
авиационной техники,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
✉ [vbr2604@mail.ru](mailto:vbr2604@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-8960-5644>

##### Vera B. Raspopina,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Aircraft  
Engineering and Operation of Aviation Equipment,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
✉ [vbr2604@mail.ru](mailto:vbr2604@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-8960-5644>

##### Мартынова Валентина Владимировна,

студент,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
[martinovavalentina1202@mail.ru](mailto:martinovavalentina1202@mail.ru)

##### Valentina V. Martynova,

Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
[martinovavalentina1202@mail.ru](mailto:martinovavalentina1202@mail.ru)

##### Ступина Елизавета Антоновна,

студент,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
[liza\\_stupina03@mail.ru](mailto:liza_stupina03@mail.ru)

##### Elizaveta A. Stupina,

Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
[liza\\_stupina03@mail.ru](mailto:liza_stupina03@mail.ru)

#### Заявленный вклад авторов

#### Authors' contribution

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to the article.

#### Конфликт интересов

#### Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

#### Информация о статье

#### Information about the article

Статья поступила в редакцию 05.09.2024 г.; одобрена после рецензирования 14.10.2024 г.; принята к публикации 25.10.2024 г.

The article was submitted 05.09.2024; approved after reviewing 14.10.2024; accepted for publication 25.10.2024.



Научная статья

УДК 621.91.01

EDN: KNPZMP

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-488-503

## Оценка эффективности подавления автоколебаний при резании по изменению объёма их энергии

В.М. Свинин<sup>1✉</sup>, В.А. Ушаков<sup>2</sup>, А.В. Савилов<sup>3</sup>, А.С. Пятых<sup>4</sup>, А.А. Иринчев<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель – создание инструмента исследователя для оценки и выбора мероприятий по подавлению нежелательных автоколебаний при резании. В качестве количественного критерия эффективности подавления автоколебаний использован объем их внутренней энергии, создаваемой работой радиальной составляющей силы резания. Было принято допущение, что данная работа пропорциональна разности площадей участков срезаемого слоя металла при выходе инструмента из заготовки и врезании в каждом колебании. В качестве объекта исследований был использован маложесткий вал диаметром 48 мм, закрепленный консольно с вылетом 150 мм. Для оценки изменения объема энергии автоколебаний был использован программный продукт на языке SciLab. Обработку вала проводили проходным резцом при частоте вращения шпинделя 208 об/мин с подачей 0,122 мм/об и глубине резания 0,8 мм. Частоту модуляции скорости резания за оборот заготовки приняли равной 0,5. Изменение разности площадей участков срезаемого слоя металла при выходе инструмента из заготовки и врезании рассчитывали последовательно при варьировании глубины модуляции скорости резания в диапазоне от 0 до 30% с интервалом 1%. По результатам расчета получен график изменения относительной разности площадей участков срезаемого слоя (пропорциональной внутренней энергии автоколебаний), аналогичный графику косинусоиды с убывающим размахом. Установлено, что с повышением глубины модуляции скорости резания объем внутренней энергии автоколебаний резко снижается, периодически пульсируя около нулевых значений. Показано, что условия подавления автоколебаний соответствуют локальные минимумы графика. Для практического использования выбран четвертый локальный минимум, соответствующий глубине модуляции скорости резания, равной 13,5%. Показано, что модуляция скорости резания на данной глубине обеспечила по сравнению с постоянной скоростью резания снижение размаха колебаний более 10 раз, а амплитуды автоколебаний – более 12 раз. Полученные результаты доказывают эффективность предложенного способа оценки изменения объема энергии автоколебаний.

**Ключевые слова:** автоколебания при резании, объем внутренней энергии, разность площадей участков срезаемого слоя, модуляция скорости резания, амплитуда автоколебаний

**Финансирование.** Представленная в данной статье работа реализуется в рамках стратегического проекта ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» i.DIT – Байкальский центр цифровых производственных технологий (Программа «Приоритет 2030»).

**Для цитирования:** Свинин В.М., Ушаков В.А., Савилов А.В., Пятых А.С., Иринчев А.А. Оценка эффективности подавления автоколебаний при резании по изменению объёма их энергии // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 488–503. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-488-503>. EDN: KNPZMP.

### MECHANICAL ENGINEERING

Original article

## Suppression efficiency of self-excited vibrations in machining evaluated by changes in their energy

Valery M. Svinin<sup>1✉</sup>, Vladislav A. Ushakov<sup>2</sup>, Andrey V. Savilov<sup>3</sup>,  
Aleksey S. Pyatykh<sup>4</sup>, Andrey A. Irincheev<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The aim was to develop an approach for evaluation and suppression of undesirable self-excited vibrations during the machining process. The suppression efficiency of self-excited vibrations was evaluated by the amount of their internal energy created by the radial cutting force. This force was assumed to be proportional to the difference in the area of the cut metal layer at the tool exit from the workpiece and penetration in each vibration. The research object was a low-rigidity shaft with a diameter of 48 mm, cantilevered with an outreach of 150 mm.

Changes in the energy of self-excited vibrations were evaluated using a software package in the SciLab language. The shaft was machined with a cutting tool at a spindle speed of 208 rpm with a feed of 0.122 mm/rev and a cutting depth of 0.8 mm. The modulation frequency of the cutting speed per workpiece revolution was assumed to be 0.5. The difference in the area of the cut metal layer at the tool exit from the workpiece and penetration was calculated sequentially when varying the depth of cutting speed modulation in the range from 0 to 30% with an interval of 1%. The results obtained were used to draw a plot of changes in the relative difference of the cut layer areas (proportional to the internal energy of self-excited vibrations), similar to a cosine curve with a decreasing magnitude. An increase in the depth of cutting speed modulation was established to sharply reduce the internal energy of self-excited vibrations, periodically pulsing around zero values. The local minima of the plot corresponded to the condition of suppression of self-excited vibrations. The fourth local minimum corresponding to the depth of cutting speed modulation equal to 13.5% was selected as a parameter for practical use. At this depth, cutting speed modulation ensured a more than 10-fold decrease in the vibration range and a 12-fold decrease in the vibration amplitude, in comparison with similar parameters at the constant cutting speed. The results obtained confirm the efficiency of the proposed method for evaluating changes in the energy of self-excited vibrations during the machining process.

**Keywords:** self-oscillation under cutting, volume of internal energy, difference in areas of the cut layer sections, cutting speed modulation, self-oscillation amplitude

**Funding.** The work presented in this article is implemented within the framework of the strategic project i.DIT – Baikal Center for Digital Production Technologies (Priority 2030 Program) of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Irkutsk National Research Technical University».

**For citation:** Svinin V.M., Ushakov V.A., Savilov A.V., Pyatykh A.S., Irincheev A.A. Suppression efficiency of self-excited vibrations in machining evaluated by changes in their energy. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):488-503. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-488-503>. EDN: KNPZMP.

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях недостаточной жесткости отдельных элементов технологической системы (ТС) механической обработки заготовок резанием или большим силовом нагружении могут возбуждаться автоколебания, резко снижающие точность и качество обработанной поверхности, стойкость инструмента и долговечность оборудования, производительность и экономичность обработки, санитарно-гигиенические условия труда. Поэтому разработка мероприятий по подавлению автоколебаний остается приоритетным направлением развития машиностроения со середины прошлого века в связи со стремлением максимально возможного облегчения массы (и, соответственно, жесткости) деталей проектируемых машин и применения по разным причинам для их изготовления труднообрабатываемых материалов [1]. Способы и устройства для подавления автоколебаний в металлорежущих станках весьма разнообразны по принципу действия, конструктивному исполнению, материальным затратам и эффективности [2]. Их выбор в каждом конкретном случае, как правило, не однозначен и часто сопряжен со значительными временными и финансовыми затратами на реализацию. Выбор мероприятий существенно облегчается при использовании количественного показателя их эффективности. В качестве такого показателя предлагается использовать величину относительного изменения объема энергии, идущей на под-

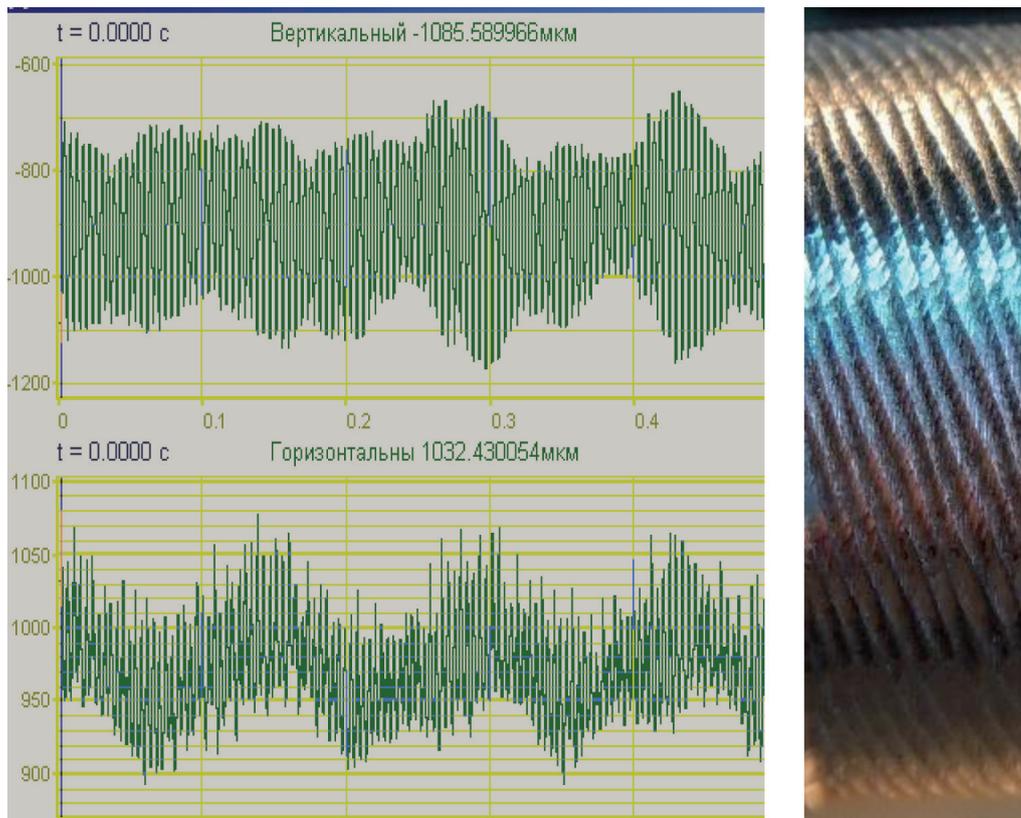
держание и развитие автоколебаний. Целью представленной статьи является создание удобного и надежного инструмента исследователя для оценки и выбора мероприятий по подавлению автоколебаний ТС.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ПОДАВЛЕНИЯ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ

Среди первичных причин возбуждения автоколебаний наибольшее признание получили координатная связь упругих деформаций ТС с несколькими степенями свободы и процесса резания, приводящая к замкнутой траектории перемещения режущего лезвия в виде эллипса [3], и запаздывание силы резания относительно изменения толщины срезаемого слоя [4]. Однако интенсивность вторичного возбуждения регенерацией следа на порядок выше и превышает интенсивность первичного возбуждения [5]. Пример регенеративного возбуждения автоколебаний при точении маложесткого вала приведен в работе [6]. На рис. 1 показаны виброграммы вертикальных и горизонтальных колебаний заготовки, измеренные при точении вала, и обработанная поверхность с ярко выраженным винтообразным узором. Полученный эффект связан с опережением по фазе текущих колебаний относительно колебаний вибрационного следа (рис. 2). Основные параметры автоколебаний (амплитуда, частота и фаза) определяются, с одной стороны, со-

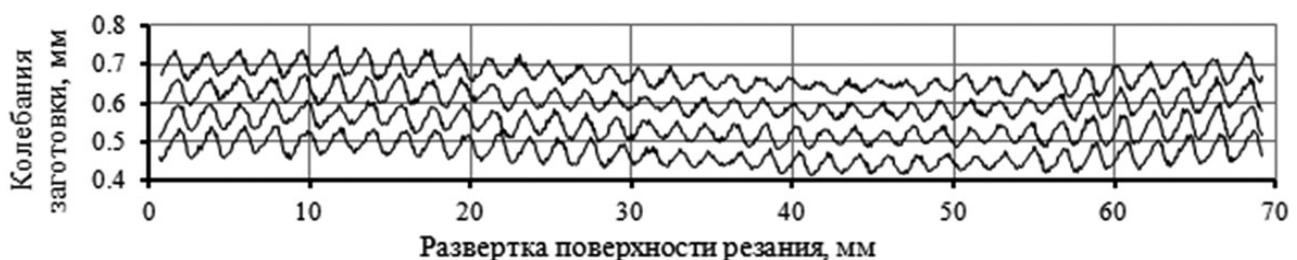
отношением колебательных свойств ТС (массы, жесткости и демпфирования) и силового возбуждения процесса резания, а с другой – стесненностью процесса их регенерации. Если на поверхности резания размещается целое число волн автоколебаний, то регенерация является свободной, и фаза принимает значение  $+90^\circ$  ( $+\pi/2$ ), т.е. автоколебания опережают след на половину волны. Такое значение фазы устанавливается вследствие минимизации ТС своих энергетических затрат на совершение колебательного движе-

ния [7]. При скоростях резания, когда не выполняется условие кратности длины волны автоколебаний длине поверхности резания, регенерация становится стесненной. При этом ТС вынуждена изменять длину волны автоколебаний путем растягивания или сжатия, чтобы разместить их на поверхности резания без остатка. Это проявляется в периодическом изменении частоты и амплитуды автоколебаний, что иллюстрирует известная «лепестковая» диаграмма динамической устойчивости ТС, предложенная Мерриттом.



**Рис. 1.** Виброграммы вертикальных и горизонтальных колебаний заготовки и вид обработанной поверхности:  $t = 0,25$  мм;  $S_o = 0,095$  мм/об;  $n = 400$  об/мин [6]

**Fig. 1.** Vibrograms of workpiece vertical and horizontal oscillations and the type of machined surface:  $t = 0.25$  mm;  $S_o = 0.095$  mm/rev;  $n = 400$  rpm [6]



**Рис. 2.** Траектории движения заготовки относительно инструмента в сечении, перпендикулярном поверхности резания:  $t = 0,25$  мм;  $S_o = 0,095$  мм/об;  $n = 400$  об/мин [6]

**Fig. 2.** Workpiece movement trajectories relative to the tool in the section perpendicular to the cutting surface:  $t = 0.25$  mm;  $S_o = 0.095$  mm/rev;  $n = 400$  rpm [6]

На рис. 3 приведен пример диаграммы устойчивости для системы с одной степенью свободы. Данный рисунок показывает изменение частоты автоколебаний  $f_0$  и отношение жесткости резания  $k_c$ , и статической жесткости  $k_m$  ТС от частоты вращения. В данном случае отношение указанных жесткостей характеризует возможность ТС обеспечить большой объем удаляемого материала за счет стабильных условий резания. Аналогичная ситуация показана и на рис. 4, где дополнительно отражено изменение фазы автоколебаний в зависимости от скорости резания. Наименьший предел устойчивости и, соответственно, наибольшая амплитуда автоколебаний наблюдаются при свободной регенерации. Стесненность регенерации ограничивает амплитуду автоколебаний и может рассматриваться как средство управления ими. В пределах каждой лепестковой зоны диаграммы с повышением скорости резания плавно увеличивается частота автоколебаний, а фаза постепенно изменяет свое значение от  $0^\circ$  ( $0$ ) до  $+180^\circ$  ( $+\pi$ ). В момент перехода к следующей зоне фаза скачком возвращается к значению  $0^\circ$ . Таким образом, в реальных условиях механической обработки автоколебания происходят с опережением следа около четверти волны.

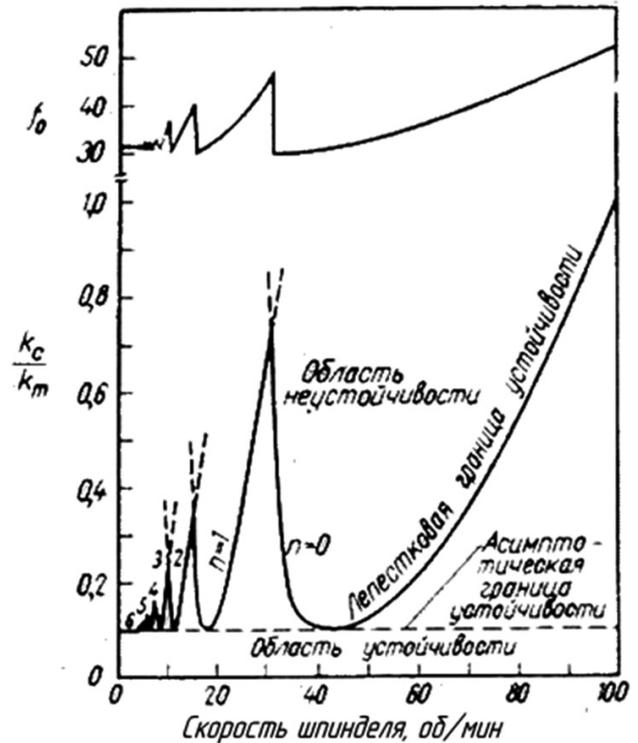


Рис. 3. Диаграмма устойчивости для системы с одной степенью свободы [8]

Fig. 3. Stability diagram for a system with one degree of freedom [8]

Такое опережение создает энергетический источник поддержания и развития автоколебаний. В ходе колебательного движения при выходе инструмента из заготов-

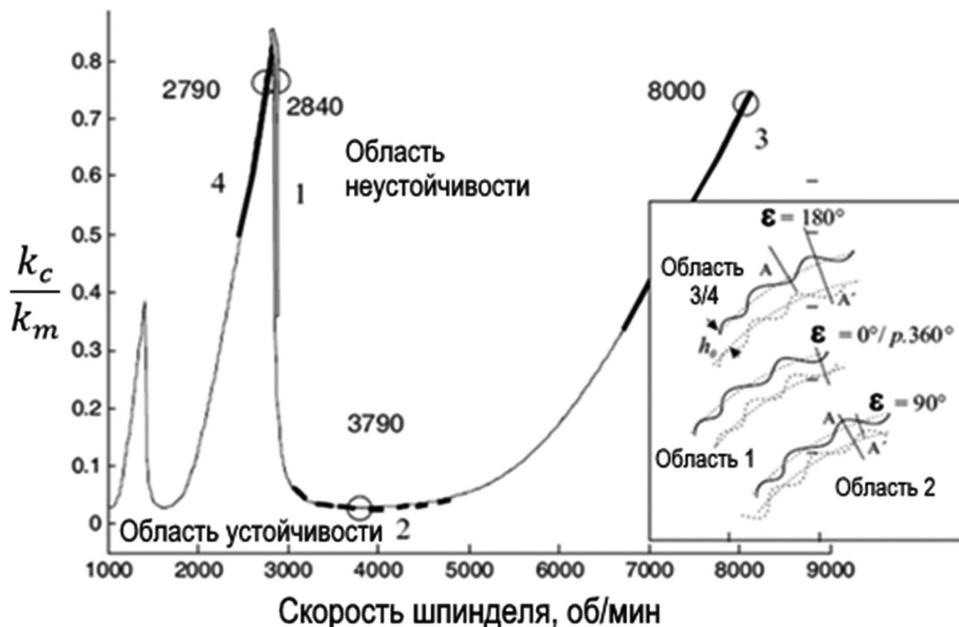


Рис. 4. Изменение фазы автоколебаний в зависимости от скорости резания<sup>6</sup>

Fig. 4. Change in the self-oscillation phase depending on the cutting speed<sup>6</sup>

<sup>6</sup>Ganguli A. Chatter reduction through active vibration damping: PhD dissertation. Université Libre de Bruxelles, 2005. 166 p.

ки толщина срезаемого слоя  $a$  (мкм) и, соответственно, радиальная составляющая силы резания  $F_{\text{вых}}$  оказываются большими, чем сила резания при врезании инструмента в заготовку  $F_{\text{вх}}$  (рис. 5). Положительная разность силы резания определяет порцию энергии, получаемой ТС при каждом колебании. Влияние других значений фазового сдвига автоколебаний представлено на рис. 6. На данном рис. 6 показано направление скорости резания  $V_{\text{рез}}$ . Если текущим колебаниям ТС принудительно сообщить фазу  $-90^\circ$  ( $-\pi/2$ ), т.е. отставание от следа на полволны, то при выходе инструмента из заготовки толщина срезаемого слоя будет меньше чем при врезании и ТС не получит энергии на поддержание автоколебаний. Наоборот, произойдет расходование запасенной ТС энергии, и автоколебания быстро затухнут. При значениях фазы  $0$  и  $+180^\circ$  ( $+\pi$ ) разность толщин среза при врезании и выходе инструмента остается постоянной, сила резания не совершает работы, запас энергии ТС не меняется.

Таким образом, представленная картина объясняет физическую сущность механизма регенерации автоколебаний при лезвийной механической обработке.

Для подавления механизма регенерации автоколебаний существуют следующие пути:

1. Снижение силовой напряженности процесса резания (изменением геометрических параметров лезвий инструментов и их количеством; выбором схемы резания,

например, замены генераторной или профильной схемы резания на групповую и т.д.).

2. Повышение жесткости наиболее слабых элементов ТС или изменение ориентации в пространстве их осей жесткости.

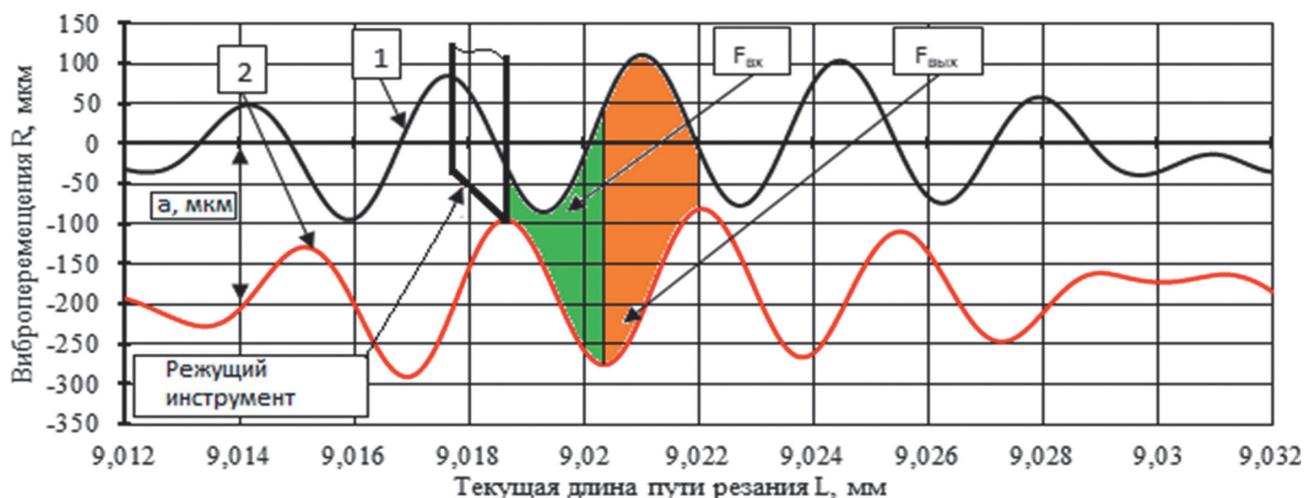
3. Повышение степени демпфирования элементов ТС или самого процесса резания.

4. Подавление механизма регенерации автоколебаний воздействием на их фазу путем использования инструментов с переменным шагом зубьев или модуляции скорости резания.

### СУЩНОСТЬ СПОСОБА ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГИИ АУТКОЛЕБАНИЙ

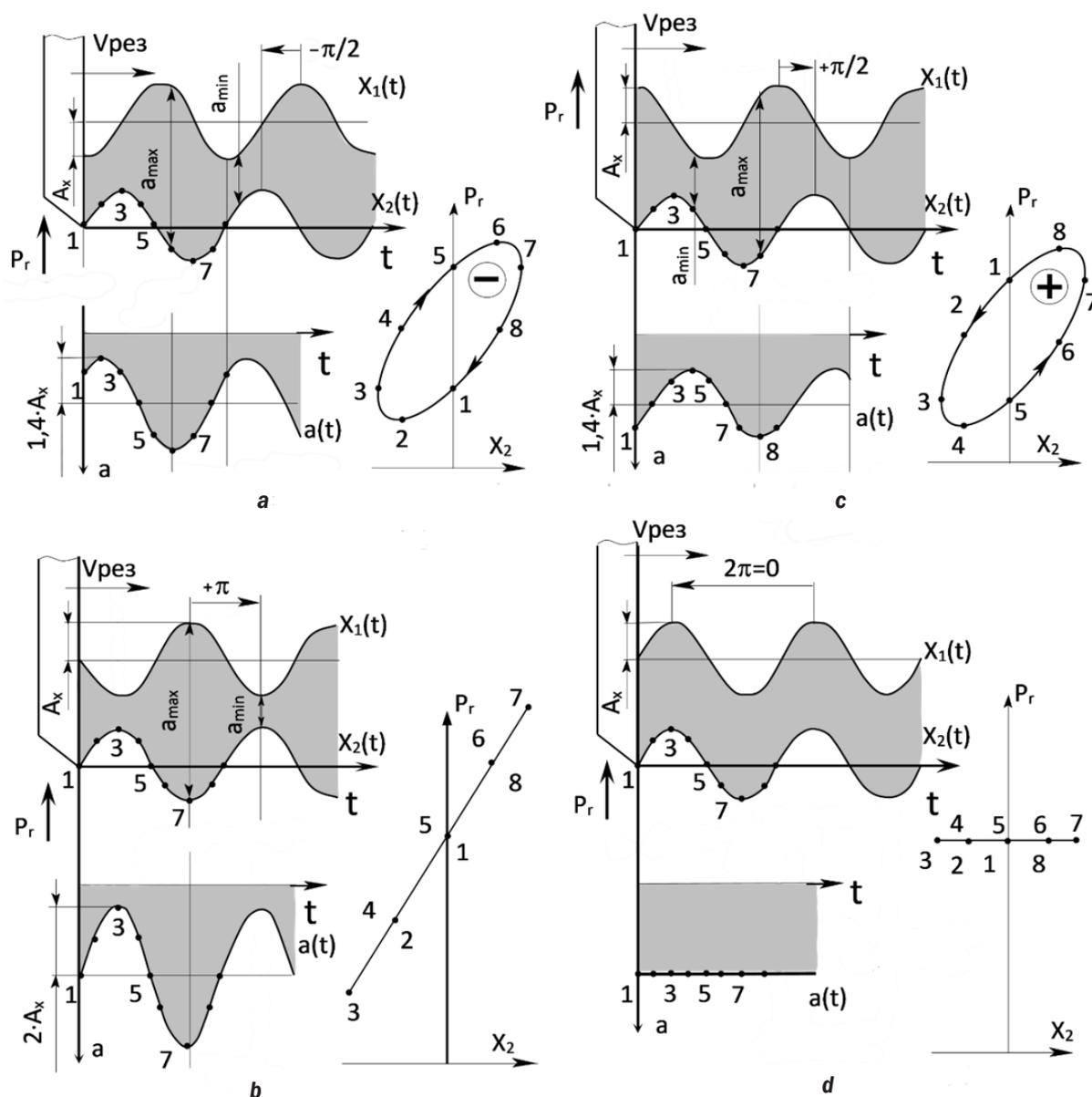
Запас энергии автоколебаний создается работой силы резания. Математически за период одного колебания она выражается интегралом произведения радиальной составляющей силы резания на скорость вибрационного перемещения в нормальном к поверхности резания направлении. Увеличение или уменьшение объема этой энергии ведет, соответственно, к нарастанию или подавлению амплитуды автоколебаний.

Аналитический расчет внутренней энергии автоколебаний требует знания точных значений параметров ТС и процесса резания. Кроме того, он сопряжен с определенными математическими трудностями [10–13]. Расчет может быть значительно упрощен при допущении, что энергия автоколебаний пропорциональна разности площадей участков срезаемого слоя при вы-



**Рис. 5.** Совмещенные траектории текущих автоколебаний и вибрационного следа при постоянной скорости резания и фазовом сдвиге  $+90^\circ$ : 1 – вибрационный след, 2 – текущие автоколебания [9]

**Fig. 5.** Combined trajectories of current self-oscillations and vibration trace at constant cutting speed and phase shift  $+90^\circ$ : 1 – vibration trace, 2 – current self-oscillations [9]



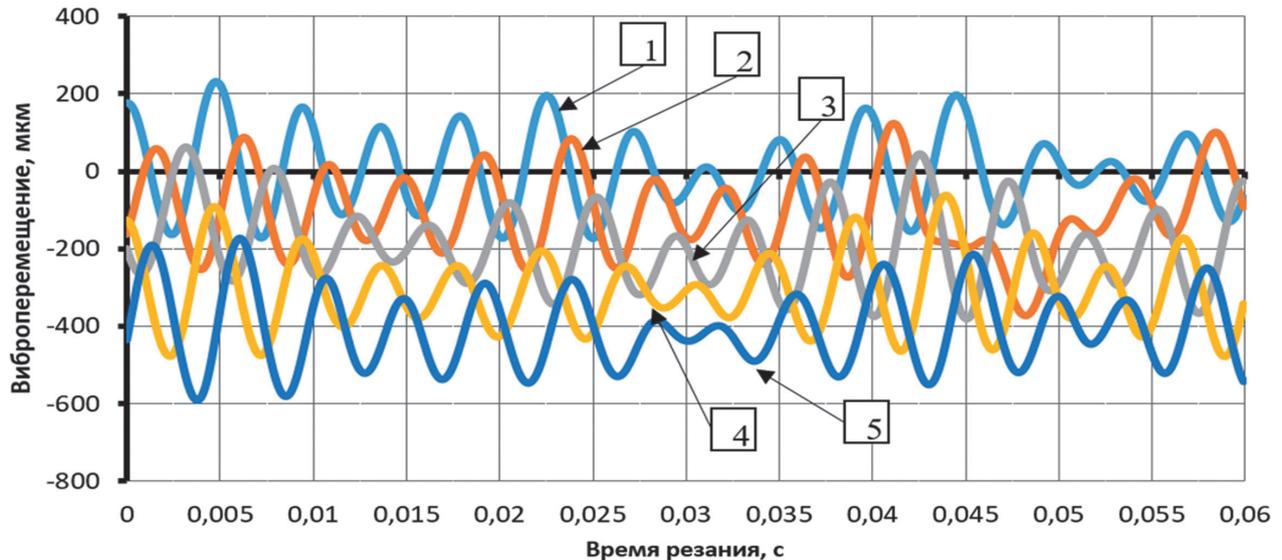
**Рис. 6.** Схемы относительного расположения траекторий колебательного движения смежных зубьев  $X_1(t)$  и  $X_2(t)$ , графики изменения толщины срезаемого слоя  $a(t)$  и диаграммы работы нормальной силы резания  $P_r$  в зависимости от начальной фазы: а -  $\varphi_{21} = \pi/2$ ; б -  $\varphi_{21} = \pi$ ; в -  $\varphi_{21} = 3\pi/2$ ; д -  $\varphi_{21} = 2\pi$  [9]

**Fig. 6.** Diagrams of relative location of oscillatory motion trajectories of adjacent teeth  $X_1(t)$  and  $X_2(t)$ , graphs of cut layer thickness variation  $a(t)$  and diagrams of the normal cutting force  $P_r$  work depending on the initial phase: а -  $\varphi_{21} = \pi/2$ ; б -  $\varphi_{21} = \pi$ ; в -  $\varphi_{21} = 3\pi/2$ ; д -  $\varphi_{21} = 2\pi$  [9]

ходе инструмента из заготовки и врезания. Площади этих участков можно определить по виброграммам относительных колебаний инструмента и заготовки.

Оценка эффективности мероприятия повышения динамической устойчивости ТС заключается в нахождении расчетным путем по экспериментальным и смоделированным виброграммам степени относительного уменьшения объема внутренней энергии автоколебаний. Экспериментально полученные

виброграммы автоколебаний обычно имеют форму пульсаций (рис. 7). По этим виброграммам определяют частоты собственных автоколебаний и их пульсаций, усредненные за период пульсации значения минимальных и максимальных амплитуд автоколебаний, фазовое смещение на смежных оборотах заготовки и кратность регенеративного эффекта. Для уточнения численных значений этих параметров можно использовать спектральный анализ виброграмм.

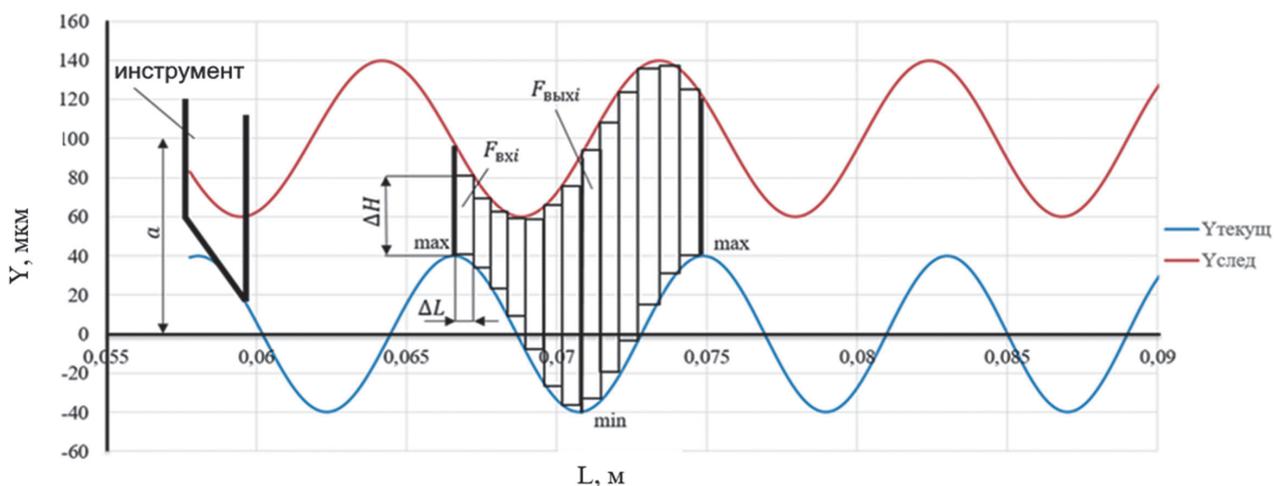


**Рис. 7.** Виброграммы колебаний заготовки при постоянной скорости резания: 1 – первый оборот заготовки, 2 – второй, 3 – третий, 4 – четвертый, 5 – пятый

**Fig. 7.** Workpiece oscillation vibrograms at constant cutting speed: 1 – the first revolution of the workpiece, 2 – the second revolution, 3 – the third revolution, 4 – the fourth revolution, 5 – the fifth revolution

Программа расчета, разработанная в ИРНИТУ, написана на языке программирования SciLab. Первый этап расчета служит определению объема энергии автоколебаний ТС в исходном состоянии, т.е. до применения специального мероприятия. Для количества оборотов, превышающего кратность регенеративного эффекта на единицу, строят последовательно расположенные траектории относительного вибрационного перемещения инструмента и заготовки в направлении условной координаты  $Y$  с параметрами, определенными опытным путем. В каждом текущем автоколебании, входящем в цикл пульсации, рассчитывают площади участков

врезания и выхода инструмента из заготовки как суммы площадей элементарных прямоугольников, размещаемых на этих участках (рис. 8). Ширину прямоугольников  $\Delta L$  выбирают равной длине пути резания  $L$  за одну двадцатую периода автоколебаний. Высота каждого из прямоугольников  $\Delta H$  определяется расстоянием до ближайшей траектории одного из предыдущих проходов. Для каждого колебания, входящего в цикл пульсации, рассчитывают разность площадей участков выхода и врезания инструмента. Далее эту разность усредняют за цикл пульсации и принимают в качестве эталонной меры энергии автоколебаний ТС в исходном состоянии.



**Рис. 8.** Схема расчета площадей участков врезания и выхода инструмента из заготовки

**Fig. 8.** Calculation scheme of areas of tool entry and exit from the workpiece

Второй этап расчета определяет запас энергии автоколебаний ТС после реализации мероприятия по их подавлению. Каждое такое мероприятие ослабляет регенеративный эффект процесса резания вследствие изменения размеров, формы и взаимного расположения траекторий вибрационных следов. В ходе второго этапа расчета выявляют влияние исходных параметров мероприятия на трансформацию вибрационных траекторий. Далее, согласно установленным закономерностям, задают несколько значений исходных параметров или их сочетаний и для каждого из них моделируют набор вибрационных траекторий, по которым рассчитывают объем внутренней энергии автоколебаний, сравниваемый с эталонным значением. Такая манипуляция позволяет установить наилучшие значения параметров мероприятия для подавления автоколебаний. Пример конкретного использования описанного способа приведен в следующем разделе.

#### **ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ СПОСОБА ДЛЯ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЯЦИИ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ**

Одним из сравнительно новых способов повышения динамической устойчивости токарной обработки является применение модулированной, т.е. периодически изменяемой по определенному закону скорости резания. Чаще других используют гармонический (синусоидальный) закон изменения скорости из-за большей простоты реализации. Он характеризуется двумя безразмерными параметрами: RVF (от англ. Relative Variation Frequency) – количеством изменений скорости резания за один оборот заготовки или инструмента и RVA (от англ. Ratio of Variation Amplitude) – отношением величины приращения или убывания скорости к величине ее среднего значения.

Модуляция скорости резания изменяет форму траектории относительного колебательного движения инструмента и заготовки, чередуя последовательное ее растяжение и сжатие в каждом цикле модуляции. Вследствие этого фазовый сдвиг автоколебаний в течение цикла модуляции скорости резания изменяется от  $+90^\circ$  ( $+\pi/2$ ) до некоторой

меньшей величины (в пределе до  $-90^\circ$  ( $-\pi/2$ )) и обратно. При значении фазового сдвига  $+90^\circ$  разность силы резания в течение одного колебания положительна и ТС получает порцию энергии за этот период. Если фазовый сдвиг равен  $-90^\circ$ , то разность силы резания отрицательна и энергия из системы отводится. При фазовых сдвигах  $0$  и  $180^\circ$  разность силы резания нулевая и подвода или отвода энергии не происходит. Амплитуда автоколебаний также меняется: она максимальна на участках траектории движения инструмента, где фазовый сдвиг близок к  $+90^\circ$ , и минимальна при  $-90^\circ$ . В целом повышение параметров модуляции скорости резания до определенных значений способствует устойчивому снижению амплитуды автоколебаний или даже их полному гашению, если объем энергии возбуждения от регенеративного эффекта, ослабленного модуляцией скорости резания, станет меньше объема энергии, затрачиваемой на диссипацию в ТС.

Приоритет применения модулированной скорости резания против автоколебаний принадлежит нашей стране [14]. Начиная с 70-х годов прошлого века, активное изучение этого вопроса проводят во всем мире [15–24 и др.]. Исследования показали высокую эффективность подавления автоколебаний, технологическую гибкость и удобство применения модулированной скорости резания. Имеются примеры оснащения функцией модуляции скорости резания систем числового программного управления металлорежущих станков: фирма Haas Automation (США)<sup>7</sup>.

Однако широкого промышленного применения модуляция скорости резания не получила. Это связано с отсутствием научно обоснованных рекомендаций по выбору частоты и глубины модуляции. Отыскание этих параметров опытным путем чрезвычайно трудоемко и требует больших расходов материальных ресурсов. Математическое моделирование связано с большими затратами времени и нуждается в точной идентификации динамики станка и параметров процесса резания. Поэтому в последнее время эту задачу решают на основе анализа внутренней энергии автоколебаний [10–13].

Э. Аль-Региб [10] при известной частоте

<sup>7</sup>Spindle Speed Variation - Stop chatter on your CNC lathe - Haas Automation. Режим доступа: [https://www.reddit.com/r/Machinists/comments/49wt98/spindle\\_speed\\_variation\\_stop\\_chatter\\_on\\_your\\_cnc/?rdt=38274](https://www.reddit.com/r/Machinists/comments/49wt98/spindle_speed_variation_stop_chatter_on_your_cnc/?rdt=38274) (дата обращения: 18.07.2024).

автоколебаний и заданной скорости резания на основе вычисления минимума работы радиальной составляющей силы резания, средней за цикл модуляции скорости, предложил простые эвристические уравнения для определения требуемой глубины модуляции скорости резания. Недостатком предложенного в статье способа расчета внутренней энергии автоколебаний является ограниченность области применения – только для условий обработки, соответствующих однократному регенеративному эффекту. Однако на практике обработка часто ведется в условиях многократного регенеративного эффекта, например, чистовое точение валов с малыми значениями глубины резания и подачи.

Х. Чжан [11] предлагает назначать частоту модуляции в диапазоне 0,5...2,0 % от частоты автоколебаний. Требуемая глубина модуляции определяется с использованием функции Бесселя, исходя из равенства объемов вносимой в ТС и диссипируемой из нее энергии. Недостатками предложенной методики являются высокая вычислительная сложность и необходимость предварительного определения (обычно трудоемким опытным путем) параметров ТС и процесса резания.

С. Ямато [12, 13] использовал аналогию модуляции скорости резания с частотной модуляцией FM (от англ. Frequency Modulation) в радиотехнике. Для нахождения глубины модуляции скорости резания, соответствующей минимуму внутренней энергии автоколебаний, он использовал функцию Бесселя первого рода  $n$ -го порядка с аргументом в виде индекса модуляции, представляющим собой отношение максимального сдвига частоты автоколебаний к частоте модуляции скорости резания. Индекс модуляции выражают через глубину модуляции скорости, количество волн автоколебаний на поверхности резания и их сдвиг при постоянной скорости резания. Условию подавления автоколебаний соответствуют локальные минимумы функции Бесселя, график которой похож на график косинусоиды с постепенно уменьшающимся размахом.

Предложенные в работах [10–12] методики отыскания параметров модуляции скорости резания требуют предварительного нахождения параметров ТС и процесса резания. Предлагаемый нами способ опирается только на полученные опытным путем виброграммы относительных колебаний инструмента и заготовки на принятых режимах резания. Информация о параметрах ТС и процесса резания заложена в виброграммах автоматически.

Определение наилучших значений параметров RVF и RVA выполняется на основе сравнения объемов разности площадей срезаемого слоя при выходе и врезании инструмента, работающего с постоянной и модулированной скоростью резания. Нахождение эталонного значения разности площадей при постоянной скорости резания описано в предыдущем разделе. Вторая часть расчета для конкретных значений RVF и RVA содержит нахождение мгновенной (текущей) длины пути резания и последующее определение разности площадей в каждом колебании в течение оборота заготовки, его средних значений на каждом обороте и в целом за цикл модуляции. Их соотношение с эталонным значением определяет соответствующие величины коэффициента изменения разности площадей  $K_{ирп}$ , по минимальным значениям которых выбирают искомые значения параметров RVF и RVA. Более детальная информация об алгоритме расчета приведена в материалах заявки на государственную регистрацию программы для ЭВМ<sup>8</sup>.

С целью иллюстрации применения предложенной методики отыскания параметров модуляции скорости резания рассмотрим конкретный пример точения маложесткой заготовки.

В качестве последней использовали конусоно закрепленный вал из стали 30ХГСА диаметром  $D = 48$  мм и вылетом 150 мм из кулачков. Измеренная частота собственных колебаний заготовки составила 145 Гц. Точение проводили прямым левым проходным резцом SDNCN 2020K 11 со сменной многогранной пластиной DCMT 11 T3 08-MM 1125.

<sup>8</sup>Свидетельство о гос. регистрации прог. № 2020618392, Российская Федерация. Программа расчета внутренней энергии автоколебаний при продольном точении с модуляцией скорости резания / В.М. Свинин, А.В. Шутенков, В.А. Ушаков, А.С. Пятых, М.А. Панин; правообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. Дата поступления 15.07.2020; дата гос. регистрации в Реестре 24.07.2020.

Резец был установлен в револьверной головке станка. Обработку проводили при глубине резания 0,8 мм с подачей 0,122 мм/об и частотой вращения шпинделя 208 об/мин. Использовали как постоянную скорость резания, так и модулированную по гармоническому закону.

Фиксацию виброперемещений заготовки в процессе резания выполняли с помощью оптической сенсорной головки OFV 505. Площадкой для измерений вибраций служил специально подготовленный поясok на заготовке, расположенный на расстоянии 122,8 мм от кулачков патрона. На заготовке было проточено тринадцать поясков шириной 5 мм на разных режимах резания, пять из которых было отобрано для последующего анализа. Для обеспечения равенства условий возбуждения автоколебаний на поясках, расположенных на разных расстояниях от кулачков, ординаты виброграмм, записанных на этих поясках, умножали на индивидуальный коэффициент приведения, рассчитанный по формулам теории сопротивления материалов.

Для нахождения наилучших параметров модуляции скорости резания применили описанный выше способ. Согласно рекомендациям<sup>8</sup> частоту модуляции приняли  $RVF = 0,5$ . Изменение внутренней энергии автоколебаний рассчитывали для глубины модуляции в диапазоне  $RVA = 0...30\%$ . График зависимости коэффициента  $K_{ИРП}$  от  $RVA$  представлен на рис. 9. Он показывает, что модуляция скорости резания небольшой (1%) глубины

приводит к большому (примерно на 90%) уменьшению запаса внутренней энергии автоколебаний. Дальнейшее увеличение глубины модуляции меняет знак запаса энергии, т.е. энергия не поступает в ТС для поддержания автоколебаний, а изымается из нее. При глубине модуляции 2% диссипация энергии составляет 35%. Последующее увеличение  $RVA$  сопровождается периодическим колебанием запаса энергии около нулевого значения.

Подобная картина изменения запаса внутренней энергии автоколебаний с нарастанием глубины модуляции скорости резания получена в работах С. Ямато [12, 13], что иллюстрирует график на рис. 10. График отражает значение функции Бесселя нулевого порядка первого рода, характеризующей объем энергии автоколебаний при увеличении индекса модуляции, пропорционального  $RVA$ . Условию подавления автоколебаний соответствуют локальные минимумы энергии. Однако в работах [12, 13] отмечается, что первый локальный минимум не всегда способен подавить автоколебания, поскольку из-за малости глубины модуляции энергия не успевает рассеяться.

Согласно рассчитанному изменению объема внутренней энергии автоколебаний (см. рис. 9) были проведены четыре опыта на следующих режимах точения: один с постоянной скоростью резания и три с модулированной, соответствующие первому, второму и четвертому локальным минимумам энергии, т.е.  $RVA = 0, 2, 6$  и  $13,5\%$ . Зарегистри-

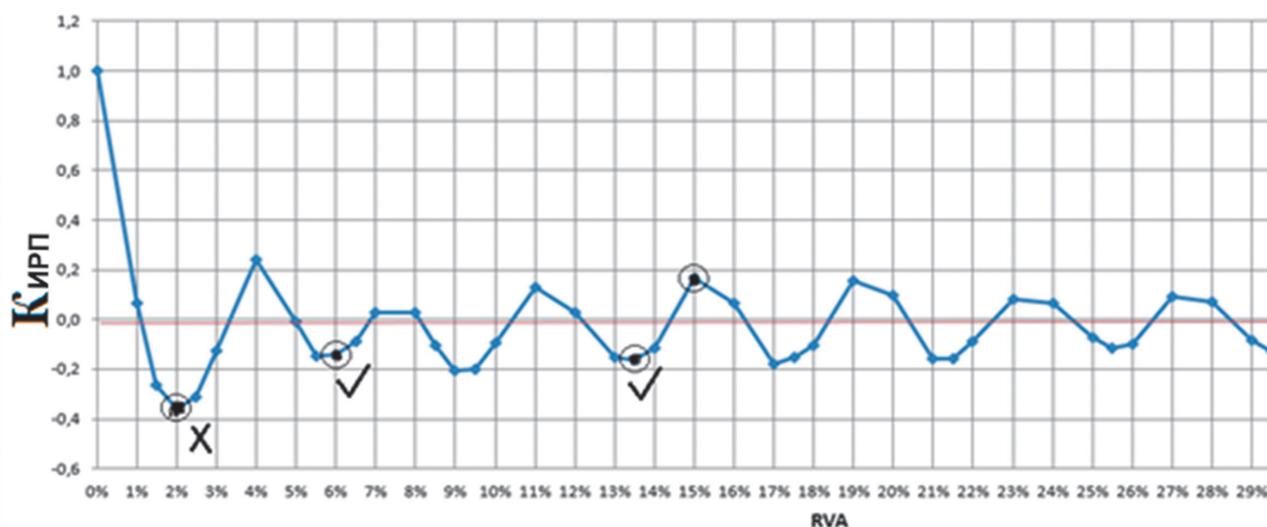
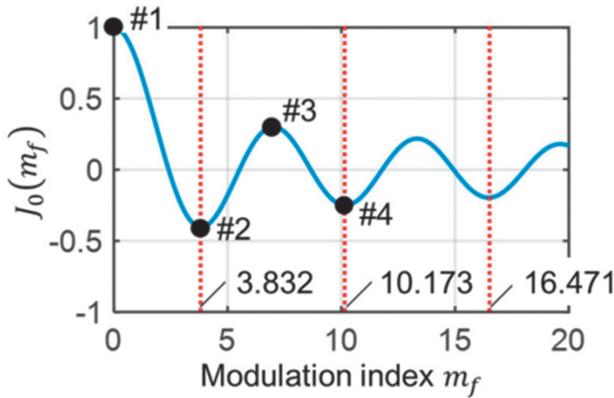


Рис. 9. Изменение коэффициента  $K_{ИРП}$  с увеличением  $RVA$ :  $RVF = 0,5$   
Fig. 9.  $K_{ИРП}$  coefficient variation with  $RVA$  increase:  $RVF = 0.5$

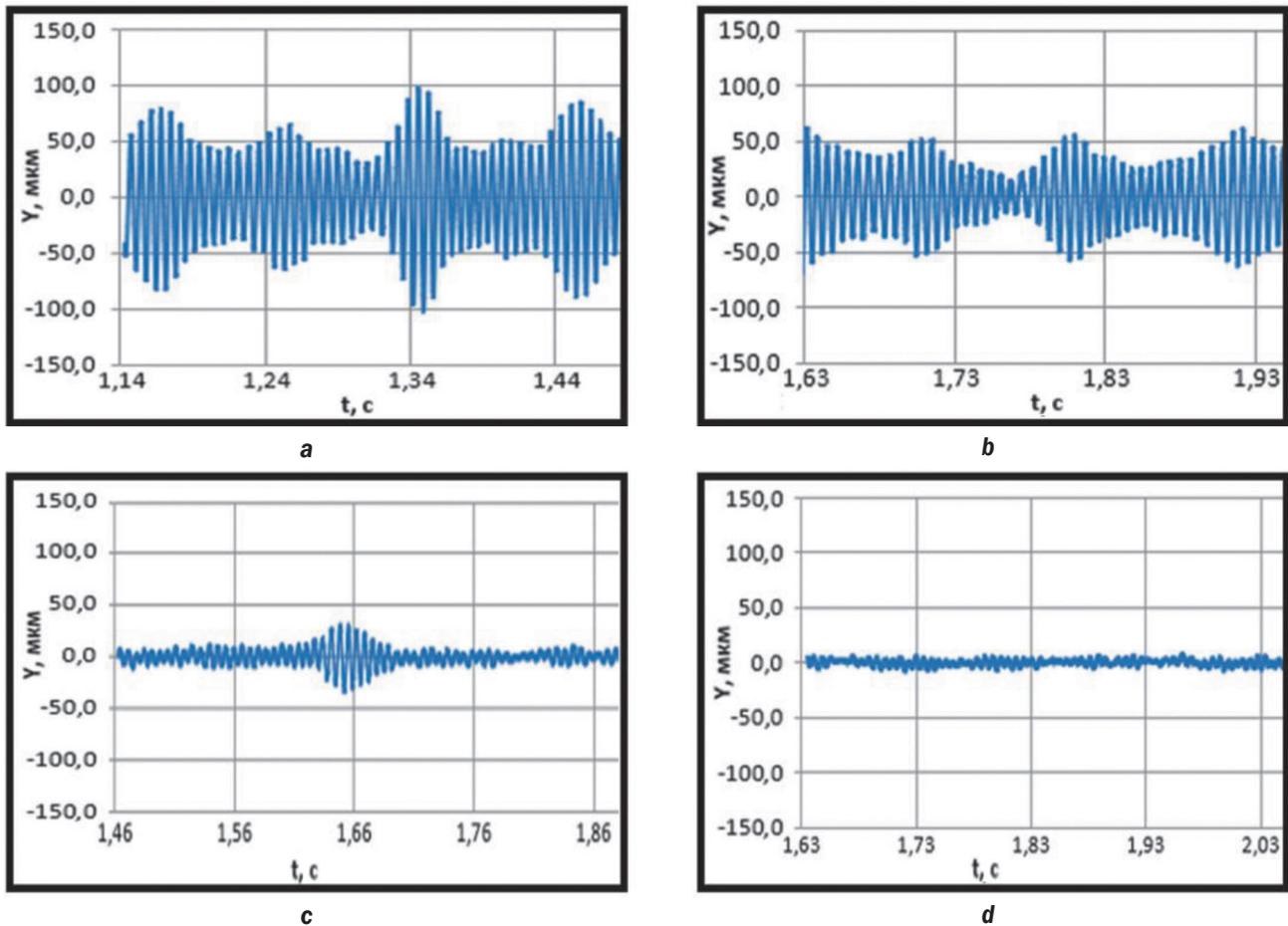


**Рис. 10.** Значение функции Бесселя нулевого порядка первого рода при возрастании индекса модуляции [12]  
**Fig. 10.** The value of the zero-order Bessel function of the first kind with modulation index increase [12]

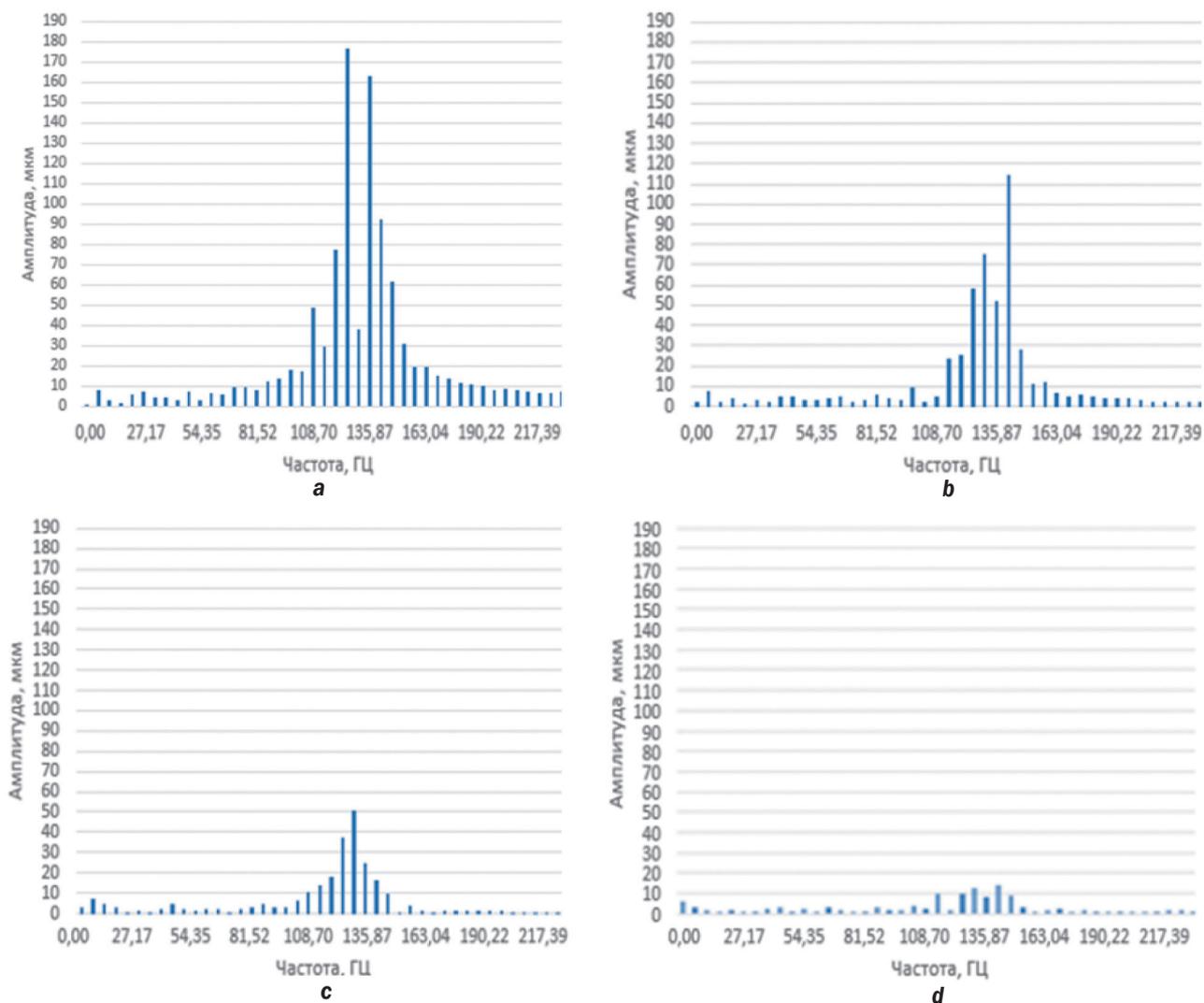
рованные в опытах виброграммы относительных колебаний заготовки и инструмента представлены на рис. 11, а их спектрограммы – на рис. 12. Фотографии обработанных поверхностей показаны на рис. 14.

На рис. 13 видно, что с переходом от постоянной скорости резания к модулированной и ростом глубины последней следы вибраций постепенно уменьшаются. Размахи  $R$  колебаний (см. рис. 11) и амплитуды  $A$  основной гармоники автоколебаний (см. рис. 12) в указанной последовательности также снижаются: а –  $R = 204$  мкм и  $A = 176$  мкм, б –  $R = 124$  мкм и  $A = 114$  мкм, в –  $R = 64$  мкм и  $A = 50$  мкм, г –  $R = 20$  мкм и  $A = 14$  мкм. Наиболее эффективной оказалась модуляция скорости резания с глубиной 13,5%. По сравнению с постоянной скоростью резания она обеспечила снижение размаха колебаний более 10 раз, а амплитуды автоколебаний – более 12 раз.

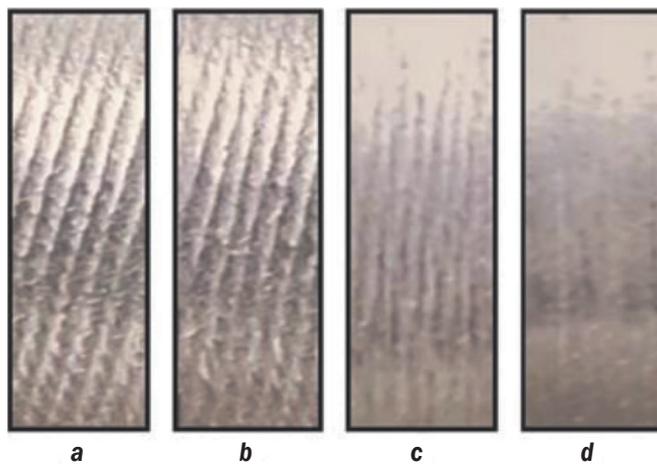
Таким образом, результаты вычисления зависимости коэффициента  $K_{ИРП}$  от роста глубины модуляции скорости резания позволили назначить рациональное значение  $RVA = 13,5\%$  при выбранном значении



**Рис. 11.** Виброграммы относительных колебаний заготовки и инструмента: а –  $RVF = 0$  и  $RVA = 0$ ; б –  $RVF = 0,5$  и  $RVA = 2\%$ ; в –  $RVF = 0,5$  и  $RVA = 6\%$ ; д –  $RVF = 0,5$  и  $RVA = 13,5\%$   
**Fig. 11.** Vibrograms of workpiece and tool relative vibrations : а –  $RVF = 0$  and  $RVA = 0$ ; б –  $RVF = 0.5$  and  $RVA = 2\%$ ; в –  $RVF = 0.5$  and  $RVA = 6\%$ ; д –  $RVF = 0.5$  and  $RVA = 13.5\%$



**Рис. 12.** Спектрограммы относительных колебаний заготовки и инструмента: а - RVF = 0 и RVA = 0; б - RVF = 0,5 и RVA = 2%; в - RVF = 0,5 и RVA = 6%; д - RVF = 0,5 и RVA = 13,5%  
**Fig. 12.** Spectrograms of workpiece and tool relative vibrations: а - RVF = 0 and RVA = 0; б - RVF = 0.5 and RVA = 2%; в - RVF = 0.5 and RVA = 6%; д - RVF = 0.5 and RVA = 13.5%



**Рис. 13.** Фотографии обработанных поверхностей при точении: а - RVF = 0 и RVA = 0; б - RVF = 0,5 и RVA = 2%; в - RVF = 0,5 и RVA = 6%; д - RVF = 0,5 и RVA = 13,5%  
**Fig. 13.** Images of the surfaces machined by turning: а - RVF = 0 and RVA = 0; б - RVF = 0.5 and RVA = 2%; в - RVF = 0.5 and RVA = 6%; д - RVF = 0.5 and RVA = 13.5%

$RVF = 0,5$  для эффективного подавления автоколебаний. Опыты по точению подтвердили правильность этого выбора. На основании изложенного можно считать доказанной эффективность способа нахождения рациональных значений параметров технических мероприятий по повышению динамической устойчивости ТС путем определения их влияния на изменение объема внутренней энергии автоколебаний.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый экспериментально-расчетный способ определения изменения объема внутренней энергии автоколебаний при применении технических мероприятий по повышению динамической устойчивости ТС. Способ основан на допущении пропорциональности объема внутренней энергии автоколебаний разности площадей участков срезаемого слоя при выходе инструмента из заготовки и врезании. Сущность способа заключается в расчете указанной разности площадей до и после применения мероприятия по повышению динамической устойчивости ТС. Расчет разности площадей выполняют на последовательно расположенных смоделированных траекториях относительных колебаний заготовки и инструмента, средние значения параметров которых определены опытным путем из процесса резания при ис-

ходном состоянии ТС. Способ предназначен для установления наилучших значений параметров технических мероприятий.

Пример реализации способа приведен для случая отыскания наилучших параметров модуляции скорости резания при точении с целью подавления автоколебаний консолюдно закрепленной заготовки. Полученная расчетом графическая зависимость разности площадей участков выхода и врезания при нарастании глубины модуляции скорости резания позволила найти наилучшее значение  $RVA = 13,5\%$  при выбранном  $RVF = 0,5$ . Проведенные затем опыты по точению показали, что модулированная с найденными параметрами скорость резания обеспечила по сравнению с постоянной скоростью снижение размаха колебаний более 10 раз и амплитуды колебаний более 12 раз, что доказывает эффективность и достоверность предложенного способа.

Этот способ может найти широкое применение для подавления автоколебаний при разных видах механической обработки. Например, синтез новых более эффективных законов модуляции скорости резания взамен используемых сейчас гармонического, треугольного и трапецеидального законов; нахождение требуемой разности шагов зубьев многолезвийных инструментов и другие случаи.

## Список источников

1. Quintana G., Ciurana J. Chatter in machining processes // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2011. Vol. 51. P. 363–376. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001>.
2. Munoa J., Beudaert X., Dombovari Z., Altintas Y., Budak E., Brecher C., et al. Chatter suppression techniques in metal cutting // CIRP Annals. 2016. Vol. 65. Iss. 2. P. 785–808. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.004>.
3. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Изд-во Машиностроение, 1967. 359 с.
4. Ташлицкий Н.И. Первичный источник энергии возбуждения автоколебаний при резании металлов // Вестник машиностроения. 1960. № 2. С. 45–50.
5. Зарс В.В. Оценка некоторых механизмов возбуждения вибрации при точении // Автоколебания станков. Вопросы механики и машиностроения: сб. науч. тр. Рига: Рижский технический университет, 1967. Вып. 6. С. 15–46.
6. Свинин В.М., Самсонов А.В., Большухин А.О. Подавление автоколебаний при точении нежестких валов пружинящим резцом // Механика – XXI веку. 2014. № 13. С. 112–119. EDN: TIYQNJ.
7. Свинин В.М. Фрезерование с модулированной скоростью резания. Иркутск: ИрГТУ, 2007. 302 с.
8. Merritt H.E. Theory of self-excited machine tool chatter // Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME. 1965. Vol. 87. P. 447–454.
9. Свинин В.М. Самоорганизация вторичных автоколебаний при лезвийной обработке // СТИН. 2006. № 1. С. 7–13.
10. Al-Regib E., Ni Jun, Lee Soo-Hun. Programming spindle speed variation for machine tool chatter suppression // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2003. Vol. 43. Iss. 12. P. 1229–1240. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00126-3](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00126-3).
11. Zhang H., Ni Jun. Internal energy based analysis on mechanism of spindle speed variation for regenerative chatter control // Journal of Vibration and Control. 2010. Vol. 16. Iss. 2. P. 281–301. <https://doi.org/10.1177/1077546309103562>.

12. Yamato S., Ito T., Matsuzaki H., Kakinuma Y. Programmable optimal design of sinusoidal SSV for regenerative chatter suppression // *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 18. P. 152–160. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2018.11.020>.
13. Yamato S., Ito T., Matsuzaki H., Fujita J., Kakinuma Ya. Self-acting optimal design of spindle speed variation for regenerative chatter suppression based on novel analysis of internal process energy behavior // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2020. Vol. 159. Part A. P. 103639. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103639>.
14. Шнепс В.А. Экспериментальное исследование влияния синусоидального изменения скорости на устойчивость резания // *Вопросы динамики и прочности*. 1970. Вып. 20. С. 123–130.
15. Takemura T., Kitamura T., Hoshi T., Okushimo K. Active suppression of chatter by programmed variation of spindle speed // *CIRP Annals*. 1974. Vol. 23. Iss. 1. P. 62–76.
16. Inamura T., Sata T. Stability analysis of cutting under varying spindle speed // *CIRP Annals*. 1974. Vol. 23. Iss. 1. P. 119–120. <https://doi.org/10.2493/JJSPE1933.43.80>.
17. Hoshi T., Sakisaka N., Moriyama I., Sato M., Higashimoto A., Tokunaga T. Study on practical application of fluctuating speed cutting for regenerative chatter control // *The Japan Society of Mechanical Engineers*. 1978. Vol. 44. Iss. 379. P. 1085–1093. <https://doi.org/10.1299/kikai1938.44.1085>.
18. Sexton J., Stone B. The stability of machining with continuously varying spindle speed // *CIRP Annals*. 1978. Vol. 27. Iss. 1. P. 317–326.
19. Jemielniak K., Widota A. Suppression of self-excited vibration by the spindle speed variation method // *International Journal of Machine Tool Design and Research*. 1984. Vol. 24. Iss. 3. P. 207–214. [https://doi.org/10.1016/0020-7357\(84\)90005-2](https://doi.org/10.1016/0020-7357(84)90005-2).
20. Jayaram S., Kapoor S., DeVor R. Analytical stability analysis of variable spindle speed machining // *Journal of Manufacturing Science & Engineering*. 2000. Vol. 122. Iss. 3. P. 391–397. <https://doi.org/https://doi.org/10.1115/1.1285890>.
21. Inesperger T., Stepan G. Stability analysis of turning with periodic spindle speed modulation via semi-discretisation // *Journal of Vibration & Control*. 2004. Vol. 10. Iss. 12. P. 1835–1855. <https://doi.org/10.1177/1077546304044891>.
22. Otto A., Radons G. Application of spindle speed variation for chatter suppression in turning // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2013. Vol. 6. Iss. 2. P. 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2013.02.002>.
23. Urbikain G., Olvera D., De Lacalle L.N.L., Elías-Zúñiga A. Spindle speed variation technique in turning operations: modeling and real implementation // *Journal of Sound and Vibration*. 2016. Vol. 383. P. 384–396. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.07.033>.
24. Longyang Ding, Sun Yuxin, Xiong Zhenhua. Active chatter suppression in turning by simultaneous adjustment of amplitude and frequency of spindle speed variation // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020. Vol. 142. Iss. 2. P. 021004-1–021004-10. <https://doi.org/10.1115/1.4045618>.
25. Свинин В.М. Выбор параметров модуляции скорости резания для гашения регенеративных автоколебаний // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2006. № 41. С. 135–142. EDN: JWQPQV.

## References

1. Quintana G., Ciurana J. Chatter in machining processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2011;51:363-376. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001>.
2. Munoa J., Beudaert X., Dombovari Z., Altintas Y., Budak E., Brecher C., et al. Chatter suppression techniques in metal cutting. *CIRP Annals*. 2016;65(2):785-808. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.004>.
3. Kudinov V.A. *Machine tool dynamics*. Moscow: Mashinostroenie; 1967, 359 p. (In Russ.).
4. Tashlitskiy N.I. *Primary source of self-oscillation excitation energy during metal cutting*. *Russian Engineering Research*. 1960;2:45-50. (In Russ.).
5. Zars V.V. *Evaluating some vibration excitation mechanisms under turning*. In: *Avtokolebaniya stankov. Voprosy mekhaniki i mashinostroeniya: sbornik nauchnyh trudov = Self-Oscillations of machine tools. Questions of mechanics and mechanical engineering: collected scientific papers*. Riga: Rīgas Tehniskā universitāte; 1967, iss. 6, p. 15-46. (In Russ.).
6. Svinin V.M., Samsonov A.V., Bol'shuhin A.O. Suppression of self-excited oscillations during turning of non-rigid shafts with a springy cutter. *Mechanical engineers to XXI century*. 2014;13:112-119. (In Russ.). EDN: TIYQNJ.
7. Svinin V.M. *Milling with modulated cutting speed*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2007, 302 p. (In Russ.).
8. Merritt H.E. Theory of self-excited machine tool chatter. *Journal of Engineering for Industry-trans- actions of the ASME*. 1965;87:447-454. (In Russ.).
9. Svinin V.M. Self-organization of secondary self-oscillations in edge cutting machining. *Machines and Tooling*. 2006;1:7-13. (In Russ.).
10. Al-Regib E., Ni Jun, Lee Soo-Hun. Programming spindle speed variation for machine tool chatter suppression. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003;43(12):1229-1240. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00126-3](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00126-3).

11. Zhang H., Ni Jun. Internal energy based analysis on mechanism of spindle speed variation for regenerative chatter control. *Journal of Vibration and Control*. 2010;16(2):281-301. <https://doi.org/10.1177/1077546309103562>.
12. Yamato S., Ito T., Matsuzaki H., Kakinuma Y. Programmable optimal design of sinusoidal SSV for regenerative chattersuppression. *Procedia Manufacturing*. 2018;18:152-160. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2018.11.020>.
13. Yamato S., Ito T., Matsuzaki H., Fujita J., Kakinuma Ya. Self-acting optimal design of spindle speed variation for regenerative chatter suppression based on novel analysis of internal process energy behavior. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2020;159(A):103639. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103639>.
14. Shneps V.A. Experimental study of the effect of sinusoidal speed variation on cutting stability. *Voprosy dinamiki i prochnosti*. 1970;20:123-130. (In Russ.).
15. Takemura T., Kitamura T., Hoshi T., Okushimo K. Active suppression of chatter by programmed variation of spindle speed. *CIRP Annals*. 1974;23(1):62-76.
16. Inamura T., Sata T. Stability analysis of cutting under varying spindle speed. *CIRP Annals*. 1974;23(1):119-120. <https://doi.org/10.2493/JJSPE1933.43.80>.
17. Hoshi T., Sakisaka N., Moriyama I., Sato M., Higashimoto A., Tokunaga T. Study on practical application of fluctuating speed cutting for regenerative chatter control. *The Japan Society of Mechanical Engineers*. 1978;44(379):1085-1093. <https://doi.org/10.1299/kikai1938.44.1085>.
18. Sexton J., Stone B. The stability of machining with continuously varying spindle speed. *CIRP Annals*. 1978;27(1):317-326.
19. Jemielniak K., Widota A. Suppression of self-excited vibration by the spindle speed variation method. *International Journal of Machine Tool Design and Research*. 1984;24(3):207-214. [https://doi.org/10.1016/0020-7357\(84\)90005-2](https://doi.org/10.1016/0020-7357(84)90005-2).
20. Jayaram S., Kapoor S., DeVor R. Analytical stability analysis of variable spindle speed machining. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*. 2000;122(3):391-397. <https://doi.org/https://doi.org/10.1115/1.1285890>.
21. Insperger T., Stepan G. Stability analysis of turning with periodic spindle speed modulation via semi-discretisation. *Journal of Vibration & Control*. 2004;10(12):1835-1855. <https://doi.org/10.1177/1077546304044891>.
22. Otto A., Radons G., Application of spindle speed variation for chatter suppression in turning. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2013;6(2):102-109. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2013.02.002>.
23. Urbikain G., Olvera D., De Lacalle L.N.L., Elías-Zúñiga A. Spindle speed variation technique in turning operations: modeling and real implementation. *Journal of Sound and Vibration*. 2016;383:384-396. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.07.033>.
24. Longyang Ding, Sun Yuxin, Xiong Zhenhua. Active chatter suppression in turning by simultaneous adjustment of amplitude and frequency of spindle speed variation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020;142(2):021004-1-021004-10. <https://doi.org/10.1115/1.4045618>.
25. Svinin V.M. Cutting speed modulation parameter selection for chatter suppression. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2006;41:135-142. (In Russ.). EDN: JWQPQV.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ****INFORMATION ABOUT THE AUTHORS****Свинин Валерий Михайлович,**

д.т.н., профессор,  
профессор кафедры технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
✉ [svinin\\_vm@mail.ru](mailto:svinin_vm@mail.ru)

**Valery M. Svinin,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Mechanical  
Engineering Production  
Technologies and Equipment,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
✉ [svinin\\_vm@mail.ru](mailto:svinin_vm@mail.ru)

**Ушаков Владислав Александрович,**

аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
[kaivokaiva@yandex.ru](mailto:kaivokaiva@yandex.ru)  
[pren.prr@mail.ru](mailto:pren.prr@mail.ru)

**Vladislav A. Ushakov,**

Postgraduate Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
[kaivokaiva@yandex.ru](mailto:kaivokaiva@yandex.ru)  
[pren.prr@mail.ru](mailto:pren.prr@mail.ru)

**Савилов Андрей Владиславович,**

к.т.н., доцент,  
доцент кафедры технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
[saw@istu.edu](mailto:saw@istu.edu)

**Andrey V. Savilov,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of  
Mechanical Engineering Production  
Technologies and Equipment,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
[saw@istu.edu](mailto:saw@istu.edu)

**Пятых Алексей Сергеевич,**

к.т.н.,  
доцент кафедры технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
pyatykhas@ex.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-4116-9190>

**Aleksey S. Pyatykh,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor  
of the Department of Mechanical  
Engineering Production  
Technologies and Equipment,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
pyatykhas@ex.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-4116-9190>

**Иринчеев Андрей Андреевич,**

аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
andrey.iaa2000@yandex.ru

**Andrey A. Irincheev,**

Postgraduate Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
andrey.iaa2000@yandex.ru

**Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Authors' contribution**

The authors contributed equally to the article.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

*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 12.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 30.10.2024 г.; принята к публикации 07.11.2024 г.

**Information about the article**

The article was submitted 12.10.2024; approved after reviewing 30.10.2024; accepted for publication 07.11.2024.

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья  
УДК 621.316.722  
EDN: ZAWNJJ  
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-504-520



## Многоканальный элемент выбора медианного сигнала

К.А. Ахтырский<sup>1✉</sup>, В.А. Кабиров<sup>2</sup>, В.Д. Семенов<sup>3</sup>, Д.С. Торгаева<sup>4</sup>

<sup>1,3</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, Томск, Россия

<sup>4</sup>Акционерное общество «Научно-производственная фирма «Микран», Томск, Россия

**Резюме.** Цель – разработать новый вариант структуры N-канального универсального элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов, предназначенный для создания высоконадежных резервированных модульных систем электропитания космических аппаратов. Для проведения исследования и проверки работоспособности предложенной структуры N-канального элемента использовалась имитационная модель 7-канального элемента выбора, разработанная в Matlab Simulink. Для проверки работоспособности предложенного элемента выбора на программируемой логической интегральной схеме Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7 использовался модельно-ориентированный подход к проектированию, включающий в себя применение инструментов Matlab Simulink для автоматической генерации кода для программируемой логической интегральной схемы. Предложена структура N-канального элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов из выборки определения медианного сигнала, позволяющая использовать для определения медианного сигнала только те входы элемента выбора, к которым подключены сигналы с работающих модулей в составе системы электропитания. Имитационное моделирование элемента выбора медианного сигнала показало, что, в отличие от существующих аналогов, элемент выбора медианного сигнала по предложенной структуре обеспечивает передачу искомого медианного сигнала на свой выход при уменьшении количества используемых входных сигналов от N до 1. Реализация IP-блока элемента выбора на базе программируемой логической интегральной схемы Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7 показала эффективность использования ресурсов, занимая 541 логическую ячейку, а также полное соответствие разработанного IP-блока его заявленной логике работы. Представленная структура элемента выбора может быть использована для создания высоконадежных резервированных систем электропитания космических аппаратов, способных сохранять работоспособность при отказе всех модулей, вплоть до последнего. Разработанное решение может применяться в системах электропитания космических аппаратов с повышенными требованиями к отказоустойчивости.

**Ключевые слова:** элемент выбора медианного сигнала, глубокое резервирование, надежность, система электропитания, космический аппарат, имитационное моделирование

**Для цитирования:** Ахтырский К.А., Кабиров В.А., Семенов В.Д., Торгаева Д.С. Многоканальный элемент выбора медианного сигнала // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 504–520. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-504-520>. EDN: ZAWNJJ.

## POWER ENGINEERING

## Original article

## Multi-channel adaptive median signal filter

Kirill A. Akhtyrskiy<sup>1✉</sup>, Vagiz A. Kabirov<sup>2</sup>, Valeriy D. Semenov<sup>3</sup>, Darya S. Torgaeva<sup>4</sup>

<sup>1,3</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

<sup>4</sup>Research and Production company Micran Joint Stock Company, Tomsk, Russia

**Abstract.** This study aims to develop a novel structure of an N-channel adaptive median signal filter with dynamic input exclusion. The proposed design is intended for highly reliable, fault-tolerant modular redundant power supply systems for spacecraft. To investigate the functionality of the proposed N-channel filter, we developed a simulation model for a 7-channel median signal filter using MATLAB Simulink. A model-based design approach was applied to validate the performance of the proposed element using the Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7 field-programmable gate array (FPGA). The verification process involved the use of automatic code generation tools within

MATLAB Simulink for the FPGA implementation. A novel structure of the N-channel median signal filter was proposed, featuring a dynamic exclusion of unused inputs from the median calculation. This guarantees that only valid input signals from operational modules within the power supply system be included in the median calculation. The simulation results demonstrated that, in contrast to existing counterparts, the proposed filter is capable of reliably outputting the median signal as the number of active input signals decreases from N to 1. The implementation of the filter as an intellectual property (IP) block based on the Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7 FPGA demonstrated efficient resource utilisation, occupying 541 logic cells, while fully adhering to the specified operational logic. The proposed structure of the adaptive median signal filter can be employed in highly reliable, fault-tolerant spacecraft redundant power supply systems, maintaining functionality even in the event of multiple module failures, down to the last operational module. The developed solution meets the stringent fault-tolerance requirements of spacecraft power systems.

**Keywords:** median signal selection element, deep redundancy, reliability, power supply system, spacecraft, simulation modeling

**For citation:** Akhtyrskiy K.A., Kabirov V.A., Semenov V.D., Torgaeva D.S. Multi-channel adaptive median signal filter. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):504-520. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-504-520>. EDN: ZAWNJJ.

## ВВЕДЕНИЕ

Многоканальные элементы выбора медианного сигнала находят применение в автоматике и цифровой вычислительной технике и могут быть использованы для построения функциональных узлов высоконадежных технических систем автоматического регулирования и управления, в том числе резервированных, рассчитанных на количество отказов более одного [1].

Любой беспилотный космический аппарат (КА) представляет собой совокупность полезной нагрузки обслуживающих систем и бортового комплекса связи и управления [2]. Состав полезной нагрузки космического аппарата и ее требуемая мощность напрямую зависят от области его применения и изменяются в широких пределах от сотен ватт до десятков киловатт [3]. Космические аппараты выпускаются в единственном экземпляре или мелкими сериями, поэтому разработка систем электропитания под каждую конкретную задачу является трудоемкой и дорогостоящей, но в настоящее время в связи с созданием больших группировок спутников [4–6] ситуация поменялась, поэтому выпуск космических аппаратов может быть крупносерийным. Это связано с появлением проектов по созданию спутниковых систем, предназначенных для высокоскоростной широкополосной передачи данных. Такие спутниковые системы в настоящее время насчитывают в своем составе до 6 тыс. спутников, и запланировано их расширение более чем до 40 тыс. спутников, одновременно находящихся на орбите [7]. В связи с этим в настоящее время являются актуальными разработки систем электропитания космиче-

ских аппаратов (СЭП КА) с использованием унифицированных модулей преобразования энергии, позволяющих обеспечивать требуемую выходную мощность путем изменения числа параллельно включенных модулей [8–12]. В настоящее время проводятся многими промышленными предприятиями и коллективами ученых разработки модульных СЭП КА, однако такие разработки обладают рядом недостатков, связанных с реализацией равномерного деления токов между модулями при их параллельном соединении. Так, в СЭП семейства спутников Alphabus [13] равномерное распределение токов между параллельно подключенными модулями достигается с помощью системы управления, вынесенной в отдельный (центральный) модуль системы. В состав центрального модуля входит резервированный главный усилитель ошибки и не резервированный мажоритарный элемент. Такое техническое решение приводит к усложнению всей конструкции СЭП, а также негативно влияет на ее долговечность, т.к. весь центральный модуль системы и мажоритарный элемент в его составе не резервируются. В работе [14] представлена реализация модульного источника питания для ионно-плазменной установки. В предложенном авторами подходе к построению системы равномерное распределение тока нагрузки между параллельно включенными модулями достигается за счет применения принципа «ведущий – ведомый». В данной конфигурации один модуль (силовой блок) играет роль ведущего, принимая от блока управления сигналы, задающие требуемые значения выходного тока, напряжения и мощности, и передавая их ведомым

модулям. Блок управления контролирует выходную мощность ведущего модуля и устанавливает такой же уровень мощности для всех остальных модулей. Недостатком такого принципа построения СЭП является то, что при выходе из строя ведущего модуля ведомые модули потеряют источник сигнала, задающего уровень выходной мощности, тока и напряжения, что повлечет за собой выход из строя всей системы. Избавиться от данного недостатка можно путем введения в систему резервных ведущих модулей или реализации системы таким образом, чтобы все модули в ее составе являлись одинаковыми и равноправными.

В работе [15] предложено решение по построению ЭПК мощностью до 20,4 кВт на основе автономного унифицированного модуля стабилизации напряжения (МСН) мощностью 850 Вт и выходным напряжением 100 В. Данное техническое решение подразумевает реализацию цифровой системы управления силовыми преобразователями на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). При этом в каждом модуле МСН имеется свой контур регулирования напряжения, который на основании отклонения выходного напряжения от своего задающего напряжения вычисляет свой индивидуальный сигнал управляющего воздействия, что приведет к разбросу управляющих воздействий на каждом из унифицированных модулей и их неравномерной загрузке по току. Для исключения неравномерной загрузки унифицированных модулей по току в работе [15] предлагается управлять всеми унифицированными модулями единым сигналом управляющего воздействия, выбранным по медианному признаку из индивидуальных сигналов управляющего воздействия всех модулей. Для этого требуется реализовать вариант элемента выбора одного сигнала управляющего воздействия из  $N$  входных сигналов с количеством входов, равным количеству модулей МСН в ЭПК.

Таким образом, элемент выбора медианного сигнала должен выполнять функцию выбора одного сигнала управляющего воздействия, имеющего медианное значение среди нескольких входных сигналов, которые генерируются каналами обратных связей по напряжению каждого МСН; обеспечить равномерное деление токов между модулями

без деления унифицированных модулей на ведущие и ведомые; повысить надежность, отказоустойчивость и живучесть СЭП за счет глубокого резервирования МСН (два отказа и более), при этом резервирование проводится на уровне модулей МСН. Это означает, что каждый МСН (помимо своего контура регулирования напряжения) должен иметь свой элемент выбора медианного сигнала, относящийся к этому модулю и принимающий на входы сигналы управляющего воздействия от всех модулей в составе системы (включая сигнал управляющего воздействия своего модуля). Это позволит сделать модули полностью «равноправными», благодаря чему система будет сохранять работоспособность при отказе любого модуля в своем составе.

### **ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫБОРА МЕДИАННОГО СИГНАЛА**

В настоящее время в системах, разрабатываемых для применения в жестких условиях, таких как условия космического пространства, наиболее широко распространено резервирование элементов по принципу «2 из 3» и «3 из 5» [16]. Применительно к выбору сигналов управляющего воздействия или команд управления из набора соответствующих сигналов такое резервирование реализуется с помощью мажоритарных и медианных элементов. В мажоритарных элементах достоверность сигнала определяется по принципу «большинства»: достоверным считается одинаковый сигнал (в аналоговых схемах принимается, что сигналы имеют одинаковое значение (величину), если их значения отличаются на меньшую величину определенного порогового значения) на большинстве входов элемента. В медианных элементах (элементах выбора медианного сигнала) достоверность сигнала определяется по медианному принципу: достоверным считается сигнал, величина которого занимает медианное положение в списке величин всех входных сигналов элемента, отсортированных по их возрастанию.

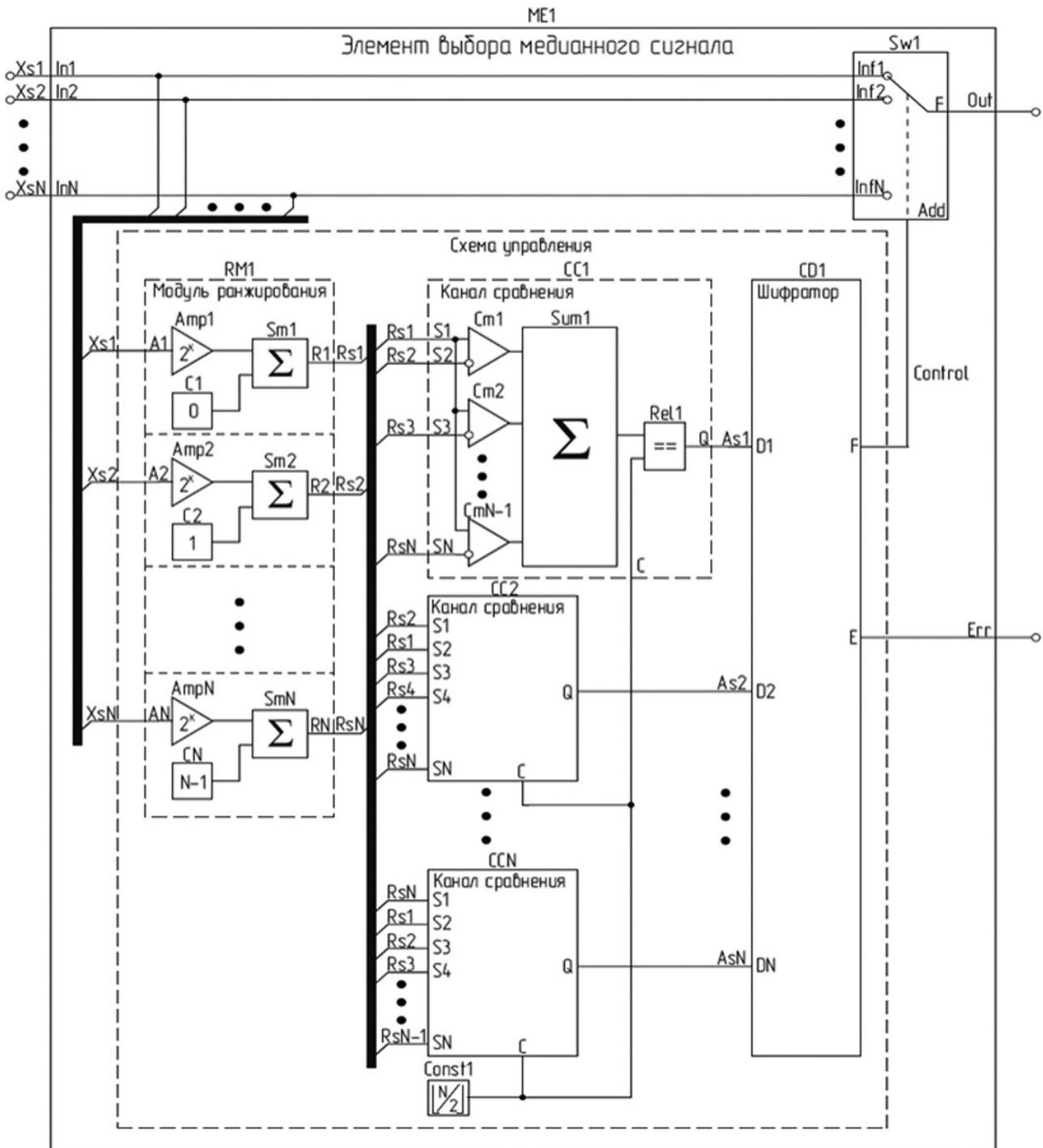
В работе [17] предлагается использовать медианный идентификатор, позволяющий реализовать резервирование систем по принципу «2 из 3». Сортировка по возрастанию величин входных сигналов предлагаемого элемента осуществляется путем их одновременного сравнения с опорным сигна-

лом, величина которого возрастает по линейному закону до максимально допустимой величины входных сигналов элемента. Сравнение величин входных сигналов с величиной опорного сигнала производится с помощью трех компараторов. В связи с тем, что величина опорного сигнала линейно нарастает, а величины входных сигналов за период изменения опорного сигнала практически не изменяются, номер компаратора, сработавшего вторым, является номером входного сигнала, величина которого занимает медианное положение среди трех входных сигналов (т.к. компаратор, сработавший первым, идентифицирует сигнал, имеющий наименьшую величину, а компаратор, сработавший третьим, – сигнал, имеющий наибольшую величину). Автором предложена схема передачи соответствующего входного сигнала на выход элемента путем коммутации управляемого переключателя. Предложенная автором схема может быть обобщена для реализации  $N$ -канального медианного идентификатора. Недостатком предложенного автором подхода к определению медианного сигнала является ограничение быстродействия его вычисления, которое определяется периодом изменения опорного сигнала. При работе с 14-разрядными входными сигналами на частоте тактирования генератора опорного сигнала, равной 200 МГц, период вычисления медианного сигнала составит около 82 мкс. Учитывая то, что для работы импульсных преобразователей в составе МСН, построенных по структуре, предложенной в работе [15], вычисление медианного сигнала должно производиться не менее одного раза за период управляющего сигнала преобразователя, максимальная частота работы преобразователей при использовании предложенного медианного идентификатора составит 12,2 кГц. Такая частота является недопустимо малой для реализации современных импульсных преобразователей для СЭП КА, поскольку с ее уменьшением увеличиваются габариты и масса преобразователей, а, следовательно, и всей СЭП КА.

Предложенный в работе [18] ранговый фильтр позволяет идентифицировать и передавать на выход один из  $N$  входных сигналов, имеющий искомый ранг (рангом сигнала является его номер в отсортированном по величине списке значений входных сигналов).

Искомый ранг сигнала задается в рассматриваемом устройстве с помощью комбинации из двух логических управляющих сигналов. Допустимые комбинации управляющих сигналов задают один из следующих искомым рангов: *ранг минимального*, *ранг максимального* или *ранг медианного сигнала*. Это позволяет использовать предложенное устройство в качестве элемента выбора медианного сигнала путем задания соответствующей комбинации управляющих сигналов. Алгоритм идентификации сигнала, имеющего искомый ранг, реализуется путем использования селекторов, причем количество входов каждого селектора становится больше с увеличением количества  $N$  входных сигналов рангового фильтра. Кроме того, количество селекторов находится в факториальной зависимости от  $N$ . Это приводит к тому, что для решения задачи идентификации медианного сигнала из 7 входных сигналов понадобится ранговый фильтр, реализация которого на ПЛИС потребует около 4 тыс. логических ячеек. При этом реализация 25-канального медианного идентификатора потребует более 5 млн логических ячеек ПЛИС. Учитывая то, что производители современных ПЛИС предлагают решения, содержащие не более нескольких сотен тысяч логических ячеек, реализация на ПЛИС рассмотренного рангового фильтра с количеством входов более 11 в настоящее время не представляется возможной. Кроме того, данный ранговый фильтр обеспечивает передачу на выход достоверного сигнала только до отказа половины модулей в составе СЭП, что не позволяет применить данное устройство для реализации СЭП с большой глубиной резервирования модулей, то есть СЭП, сохраняющих работоспособность при отказе более половины модулей в своем составе.

В работе [19] предложено техническое решение для реализации  $N$ -канального элемента выбора одного из входных сигналов любого заданного ранга от 0 до  $N-1$ , что позволяет использовать данный элемент в качестве элемента выбора медианного сигнала (задав ранг медианного сигнала в качестве искомого) при построении СЭП КА на основе автономных унифицированных МСН. Функциональная схема данного элемента выбора одного из входных сигналов представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Функциональная схема N-канального элемента выбора одного из входных сигналов  
**Fig. 1.** N-channel element cross-functional flowchart for selecting one of input signals

Предложенный авторами элемент осуществляет сравнение каждого входного сигнала с каждым с помощью N каналов сравнения  $CC_i$ , которые определяют, соответствует ли ранг этого сигнала заданному (искомый ранг сигнала задается с помощью блока константы  $Const1$ , значение сигнала на выходе которого при определении медианного сигнала вычисляется по вы-

ражению (1), причем канал сравнения, на первый (опорный) вход  $S_1$  которого приходит сигнал, имеющий заданный ранг, передает на свой выход  $Q$  логическую единицу, а все остальные каналы сравнения передают логические нули.

$$Const1_{Med} = \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor, \quad (1)$$

где  $\lfloor \cdot \rfloor$  – операция округление результата до целого в меньшую сторону;  $Const1_{Med}$  – ранг элемента, занимающего медианное положение в отсортированном по возрастанию векторе значений входных сигналов.

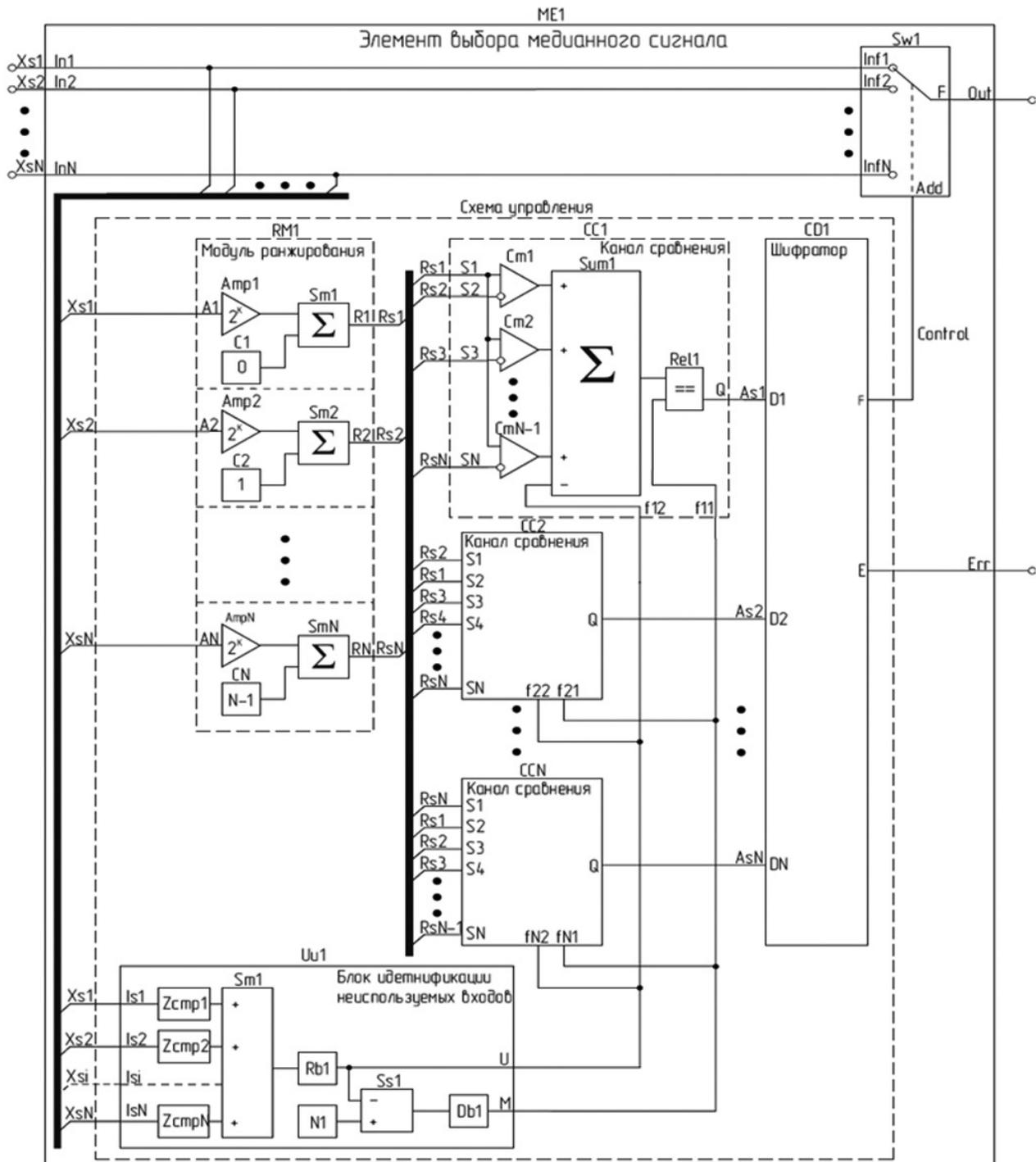
Для определения номера входного сигнала, ранг которого соответствует заданному, используется шифратор  $CD1$ , входными сигналами которого являются выходные сигналы  $Q$  каналов сравнения, причем к  $i$ -му входу шифратора подключен выход  $i$ -го канала сравнения. На выходе  $F$  шифратора формируется цифровой сигнал, значение которого равно номеру канала сравнения, на выходе которого сформирована логическая единица. Это значение равно номеру входа элемента выбора, на который подается сигнал, имеющий заданный ранг. Полученный номер входа элемента выбора передается на управляющий вход  $Add$  управляемого переключателя  $Sw1$ , который, исходя из полученного значения, передает на выход  $Out$  элемента выбора соответствующий входной сигнал заданного ранга. Достоинством данного элемента выбора является его быстродействие. Это обеспечивается за счет того, что рассматриваемый элемент выбора реализуется на ПЛИС, что позволяет обеспечить параллельную работу каналов сравнения, т.е. вычисления в каждом из них производятся одновременно. Учитывая то, что логическая схема каналов сравнения и других блоков данного элемента является комбинационной, время вычислений, производимых с помощью нее, определяется временем распространения сигналов в схеме. Кроме того, количество логических ячеек в ПЛИС, требуемых для реализации элемента выбора, увеличивается по закону, близкому к линейному, с увеличением количества входов элемента выбора. Это позволяет реализовать данный элемент выбора с количеством входов  $N = 11$  и более с использованием представленных на сегодняшний день на рынке ПЛИС. Однако данный элемент выбора медианного сигнала не может использоваться для построения СЭП с повышенными требованиями к резервированию в связи с тем, что он обеспечивает работоспособность СЭП только до отказа не более половины модулей. Таким образом, при отказе еще хотя бы одного модуля вся СЭП теряет работоспособность в связи с тем, что элемент выбора

передает на выход недоверенный сигнал управляющего воздействия. Поэтому рассматриваемый элемент выбора не может быть использован для построения СЭП, обладающих повышенной живучестью, то есть сохраняющих работоспособность при отказе более половины модулей.

Таким образом, недостатки рассмотренных выше решений для реализации элемента выбора медианного сигнала позволяют сформулировать существующую проблему, связанную с необходимостью создания  $N$ -канального универсального элемента выбора медианного сигнала для реализации высоконадежных резервированных СЭП КА, сохраняющих работоспособность вплоть до отказа последнего модуля стабилизации напряжения в своем составе.

### **ИДЕЯ (ГИПОТЕЗА) РЕШЕНИЯ И ДОСТИЖИМЫЕ ПРИ ЭТОМ ЦЕЛИ**

Идея данной работы состоит в модификации алгоритма поиска медианного сигнала среди  $N$  входных сигналов таким образом, чтобы для определения медианного сигнала использовались только те входы элемента выбора, к которым подключены сигналы с работающих модулей. То есть элемент выбора, построенный по модифицированной структуре, должен обладать функцией определения неиспользуемых входов (неиспользуемых по причине отказа соответствующих модулей или их физического отсутствия в конкретной СЭП) и их исключения из алгоритма поиска медианного сигнала. Это позволит реализовать СЭП КА с повышенной живучестью и глубиной резервирования (нагруженного и ненагруженного), сохраняющих работоспособность при изменении числа входных сигналов элемента выбора от  $N$  до 1, благодаря чему СЭП КА будет способна продолжать работу вплоть до отказа последнего унифицированного модуля в ее составе. При этом предполагается, что элемент выбора должен обеспечивать высокое быстродействие, которое позволит ему обеспечивать стабильную работу импульсных преобразователей в составе модулей СЭП на высокой частоте коммутации. Предлагаемая функциональная схема элемента выбора медианного сигнала с функцией определения неиспользуемых входов и их исключения из алгоритма поиска медианного сигнала представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Функциональная схема N-канального элемента выбора медианного сигнала с функцией определения неиспользуемых входов

**Fig. 2.** N-channel element cross-functional flowchart for selecting a median signal with the function of unused input detection

Предлагаемая модификация алгоритма работы элемента выбора медианного сигнала заключается во введении в структуру элемента выбора, представленную на рис. 1 блока идентификации неиспользуемых входов *Uu1* вместо блока константы *Const1*. На входы *Is1-IsN* данного блока поступают входные сигналы (*Xs1-XsN*) элемента выбо-

ра. Данный блок вычисляет округленное до ближайшего меньшего или равного четного числа количество неиспользуемых входов элемента выбора и передает результат на выход *U*. На выходе *M* данного блока формируется число, равное рангу сигнала, занимающего медианное положение среди оставшихся используемых входов. Ранг ме-

дианного сигнала с учетом только используемых входов элемента выбора определяется по выражению (2):

$$r_{med} = \left\lfloor \frac{N - X_{ок}}{2} \right\rfloor, \quad (2)$$

где  $r_{med}$  – искомый ранг медианного сигнала среди сигналов, поступающих на используемые входы;  $N$  – количество каналов элемента выбора медианного сигнала;  $X_{ок}$  – число  $X$  неиспользуемых входов, округленное до ближайшего меньшего или равного четного числа.

Таким образом, при выборе медианного сигнала из 7 произвольно меняющихся входных сигналов  $Xc1$ - $Xc7$ , если число неиспользуемых входов элемента равно нулю, ранг медианного сигнала, в соответствии с формулой (2), равен  $r_{med} = 3$ .

Вход блока  $UU1$  (а значит, и соответствующий вход элемента выбора) считается неиспользуемым, если на него подается отрицательное число (допустим,  $-1$ ). Таким образом, данный блок выполняет две функции: определение количества неиспользуемых входов элемента выбора и расчет ранга медианного сигнала среди используемых входов, т.е. ранг медианного сигнала, в отличие от предложенного в [19] элемента выбора, определяется не однократно, а многократно в динамическом режиме.

Кроме того, для обеспечения работы механизма исключения неиспользованных входов и динамического расчета ранга медианного сигнала среди оставшихся используемых сигналов необходимо модифицировать алгоритм работы каналов сравнения следующим образом. Сумматор  $Sumi$  каждого канала сравнения нужно заменить на сумматор-вычитатель с  $N-1$  входами сложения и одним входом вычитания, причем выходные сигналы компараторов  $Cmi$  соответствующего канала сравнения подключаются к входам сложения сумматора-вычитателя. Каждый канал сравнения в модифицированной структуре элемента выбора медианного сигнала содержит 2 управляющих входа:  $fi1$  и  $fi2$  (где  $i$  – номер канала сравнения). Вход  $fi2$  каждого канала сравнения подключается к выходу  $U$  блока идентификации неиспользуемых входов  $UU1$ , а вход  $fi1$  – к выходу  $M$  блока  $UU1$ . Сигнал с входа  $fi2$  канала сравнения подключается к вычитающему входу сумматора-вычитателя. Значение сигнала на данном входе равно количеству

неиспользуемых входов элемента выбора. Так как на неиспользуемые входы элемента выбора поступают сигналы, имеющие отрицательное значение, в упорядоченной по величине выборке входных сигналов эти сигналы будут иметь наименьший ранг (ранг любого из  $X$  неиспользуемых входов  $N$ -канального элемента выбора не может быть больше чем  $X-1$ . При этом ранг сигнала, имеющего наименьшее значение среди используемых, равен  $X$ ). При этом значение сигнала на выходе  $U$  равно либо  $X$ , если  $X$  – четное число, либо  $X-1$ , если  $X$  – нечетное число. Таким образом, если на первый вход канала сравнения поступает сигнал с одного из неиспользуемых входов элемента выбора, то на выходе сумматора-вычитателя будет либо отрицательное число, либо ноль. Формирование нуля на выходе сумматора-вычитателя при подаче на первый вход канала сравнения одного из сигналов с используемых входов означает, что сигнал, поступающий на первый вход данного канала сравнения, либо имеет минимальный ранг среди всех используемых входных сигналов, а не медианный, либо что соответствующий вход элемента выбора – единственный используемый, что делает этот сигнал медианным.

На выходе сумматора-вычитателя формируется сигнал, значение которого равно числу используемых сигналов, величины которых меньше величины сигнала, поступающего на опорный вход канала сравнения, что по определению является рангом данного сигнала среди используемых сигналов. Затем это число (ранг сигнала, являющегося опорным для соответствующего канала) сравнивается с помощью блока сравнения  $Reli$  с искомым рангом (поступающим на вход  $fi1$  данного канала сравнения с выхода  $M$  блока  $UU1$ ). В случае их равенства на выходе блока сравнения формируется логическая единица, что свидетельствует о том, что опорным сигналом данного канала сравнения является искомый медианный сигнал. В противном случае на выходе блока сравнения формируется логический ноль. Сформированный выходной сигнал блока сравнения  $Reli$  передается на выход  $Q$  соответствующего канала сравнения  $CCi$ . Выходные сигналы  $Qi$  каналов сравнения  $CCi$  являются входными для шифратора  $CD1$ , логика работы которого идентична логике работы шифратора из структуры элемента выбора, описанного в [19]. Значение выходного сиг-

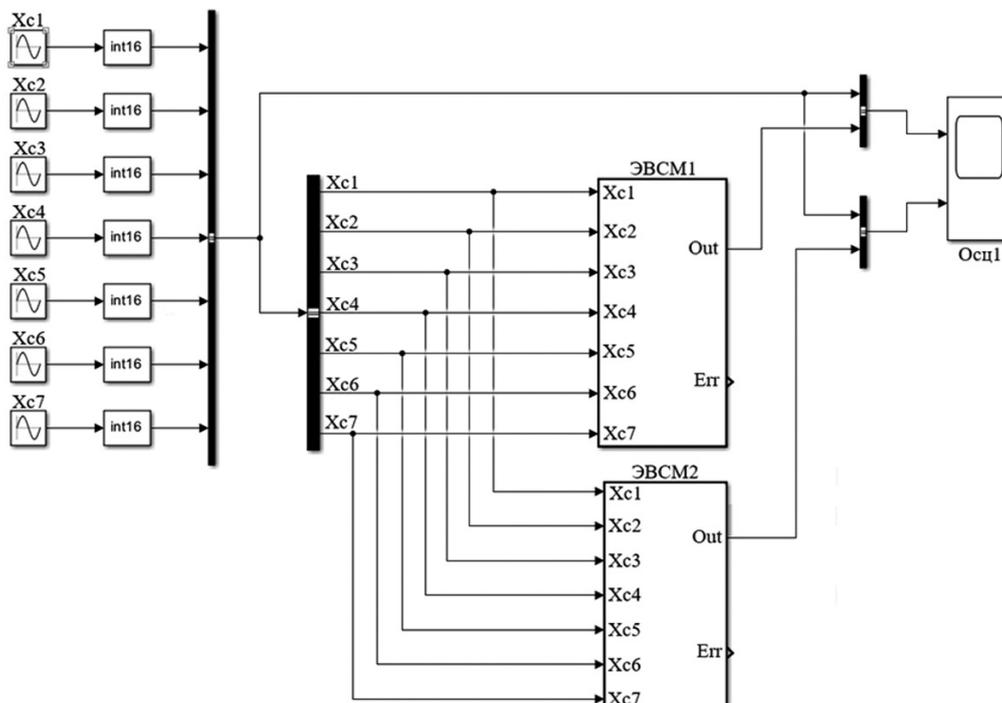
нала шифратора  $CD1$  равно номеру канала элемента выбора, на вход которого поступает сигнал, имеющий ранг медианного среди используемых сигналов. Этот сигнал является управляющим для управляемого переключателя  $Sw1$ , который коммутирует соответствующий сигнал на выход  $Out$  элемента выбора.

### ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТА ВЫБОРА МЕДИАННОГО СИГНАЛА И СРАВНЕНИЕ ЕЕ РАБОТЫ С РАБОТОЙ ЭЛЕМЕНТА ВЫБОРА МЕДИАННОГО СИГНАЛА БЕЗ ИСКЛЮЧЕНИЯ НЕИСПОЛЬЗУЕМЫХ ВХОДОВ

Для проверки работоспособности описанного выше алгоритма работы элемента выбора медианного сигнала на основе описанной выше функциональной схемы (рис. 2) в среде Matlab Simulink была разработана имитационная модель 7-канального элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов. Кроме того, для сравнения предложенной реализации элемента выбора с реализацией, описанной в [19], имитационное моделирование двух элементов выбора проводилось совместно с одинаковыми наборами входных сигналов. На рис. 3 приведена разработанная имита-

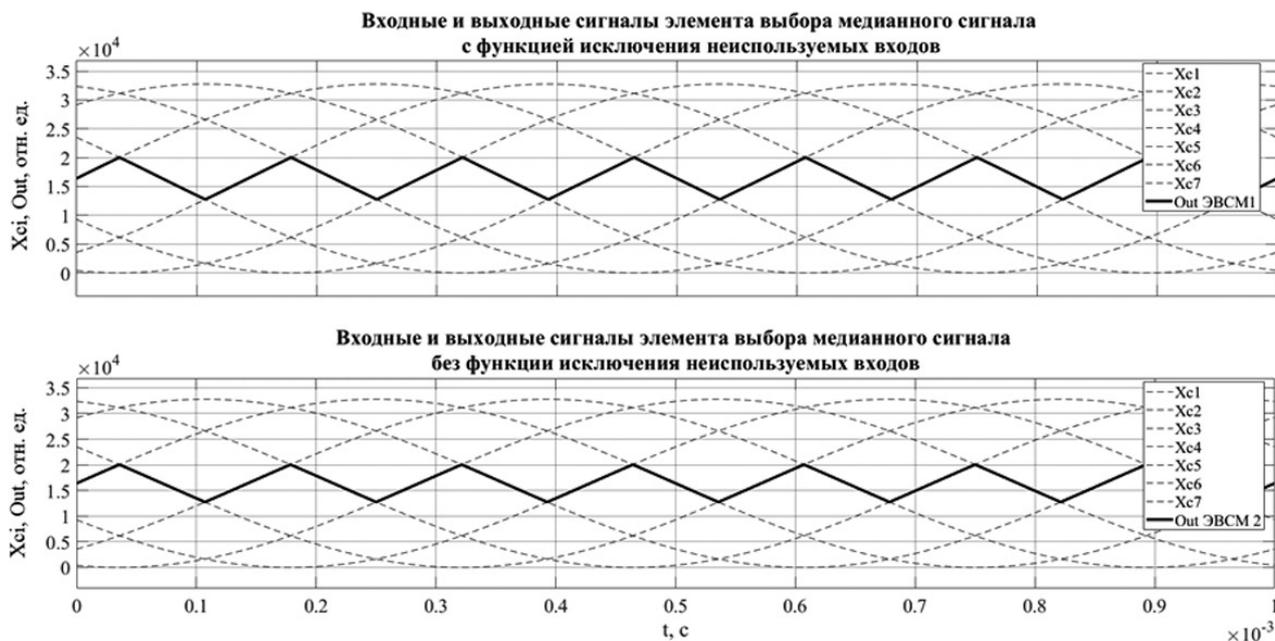
ционная модель для исследования работы двух элементов выбора медианного сигнала.

На представленной модели ЭВСМ1 – элемент выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов (по структуре, представленной на рис. 2), ЭВСМ2 – элемент выбора медианного сигнала (в блоке константы  $Const1$  задан ранг 3, что соответствует рангу медианного сигнала из 7 сигналов) без функции исключения неиспользуемых входов (по структуре, представленной на рис. 1). Для наглядной демонстрации работы элементов выбора, на их входы подается 7 цифровых синусоидальных сигналов  $Xs1-Xs7$  с частотой 1 кГц, амплитудой  $2^{14}-1$  и постоянной составляющей  $2^{14}$  (в формате int16). Входные сигналы сдвинуты друг относительно друга на  $2\pi/7$  рад, что позволяет учесть и ситуации, когда сигналы на входе имеют различные значения, и ситуации, когда их значения совпадают. Сигналы  $Xs1-Xs7$  и  $Out$  ЭВСМ1 объединены в шину и подключены к первому входу виртуального осциллографа  $Осц1$ . Сигналы  $Xs1-Xs7$  и  $Out$  ЭВСМ2 объединены в шину и подключены ко второму входу виртуального осциллографа  $Осц1$ . Результаты имитационного моделирования приведены на рис. 4.



**Рис. 3.** Имитационная модель 7-канальных элементов выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов (ЭВСМ1) и без нее (ЭВСМ2), реализованная в среде Matlab Simulink

**Fig. 3.** Simulation model of 7-channel median signal selection elements with the function of unused input exception (ЭВСМ1) and without it (ЭВСМ2) implemented in Matlab Simulink



**Рис. 4.** Диаграммы входных и выходных сигналов 7-канальных элементов выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов (ЭВСМ1, верхняя диаграмма) и без нее (ЭВСМ2, нижняя диаграмма); входные сигналы  $Xs_1$ - $Xs_N$  обозначены прерывистой линией, выходные сигналы  $Out$  выделены жирными линиями

**Fig. 4.** Input and output signal diagrams of 7-channel median signal selection elements with unused input exception function (ЭВСМ1, upper diagram) and without it (ЭВСМ2, lower diagram); dashed line indicates  $Xs_1$ - $Xs_N$  input signals, bold lines indicate output signals

Результаты моделирования показывают, что оба элемента выбора корректно определяют медианный сигнал из семи входных сигналов, когда все входы элементов выбора используются (на все входы подается сигнал, имеющий положительную величину).

Для исследования работы элементов выбора в случае отказа нескольких модулей в составе системы, в момент отказа (через 0,2 мс после начала моделирования) на соответствующий вход элементов выбора ЭВСМ1 и ЭВСМ2 подавался сигнал со значением, равным -1. С помощью подачи такого значения на вход элемента выбора система сообщает ему, что данный вход не используется по причине отказа соответствующего модуля, его перевода в режим ненагруженного резервирования, принудительного отключения или по другим причинам.

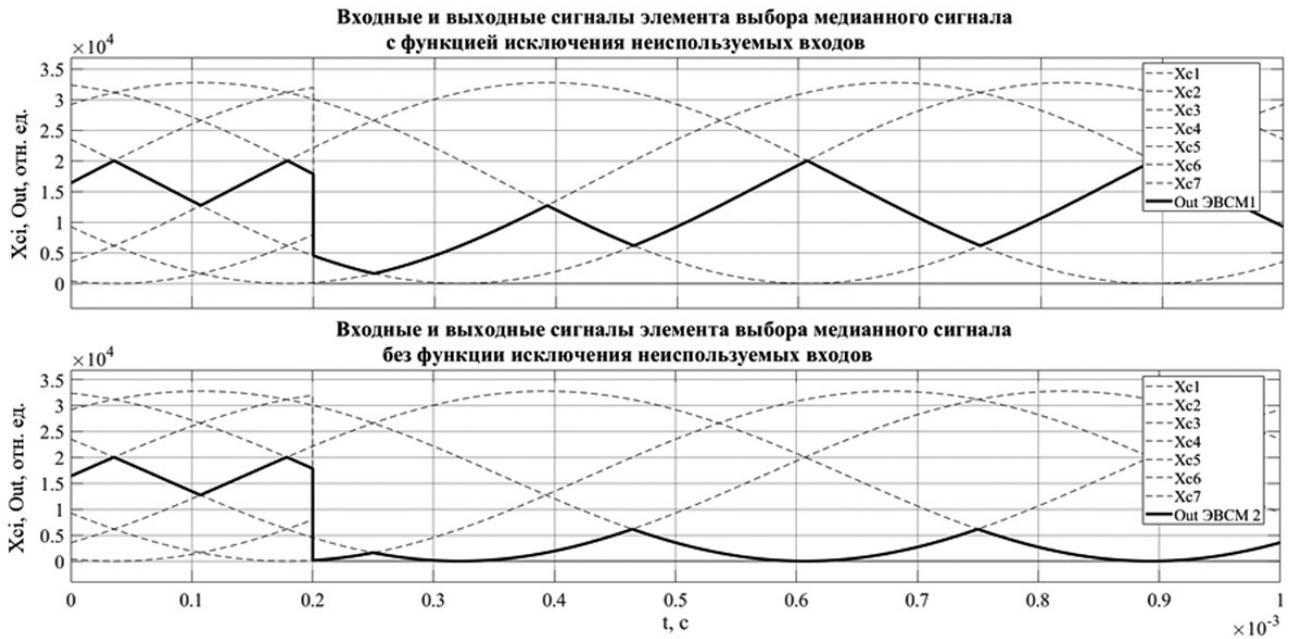
На рис. 5 представлены результаты имитационного моделирования элементов выбора медианного сигнала в случае отказа трех модулей (модули 3, 5 и 7, которым соответствуют входные сигналы модулей  $Xs_3$ ,  $Xs_5$ ,  $Xs_7$ ) в момент времени 0,2 мс.

Результаты имитационного моделирования показывают, что в случае отказа трех модулей из семи (менее половины от обще-

го числа модулей в составе системы) оба элемента выбора сохраняют работоспособность, однако выдают разные сигналы. Это связано с тем, что алгоритм работы модуля ЭВСМ2 не исключает из выборки сигналы, поступающие на неиспользуемые входы, из-за чего он продолжает передавать на выход медианный сигнал из всех 7 входных сигналов, включая сигналы, значение которых равно -1. В то же время элемент ЭВСМ1 выдает медианный сигнал из четырех оставшихся используемых входных сигналов, без учета в выборке сигналов на неиспользуемых входах. В данном случае оба элемента выбора позволят СЭП, использующим их, продолжать работу после отказа трех модулей в их составе.

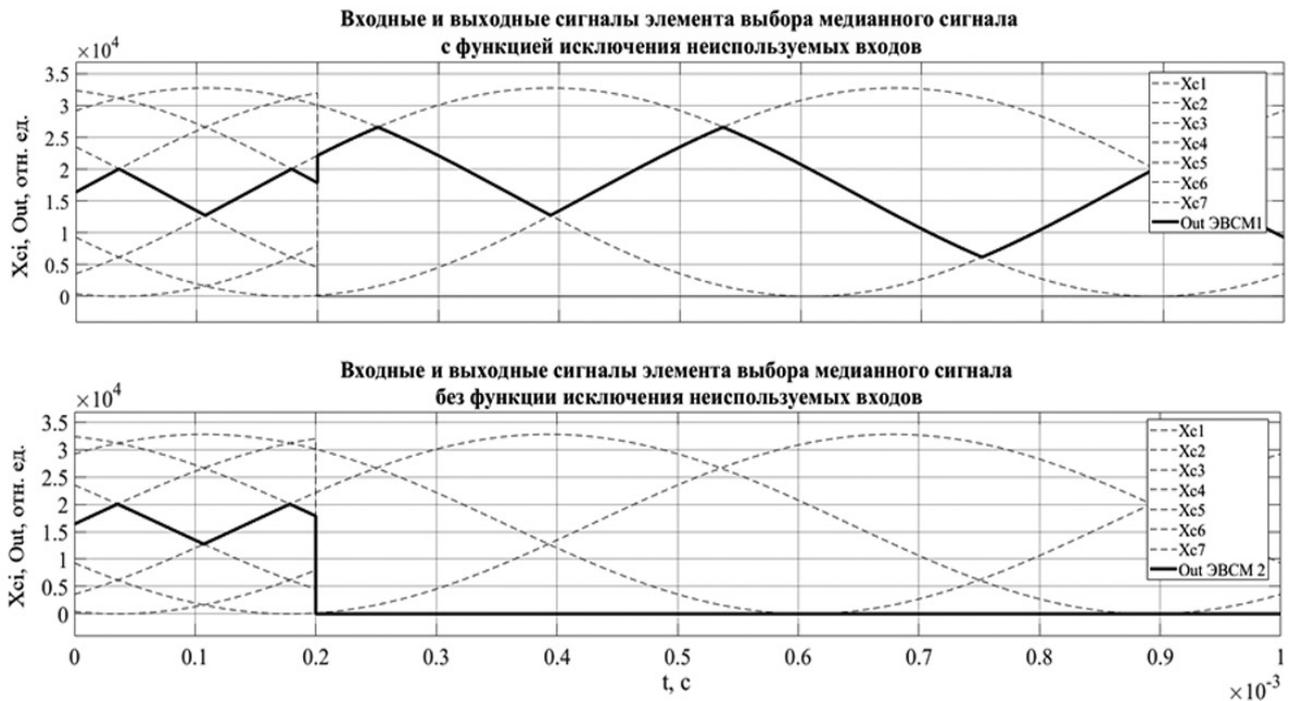
На рис. 6 представлены результаты имитационного моделирования элементов выбора медианного сигнала в случае отказа четырех модулей (модули 3, 5, 6 и 7, которым соответствуют входные сигналы модулей  $Xs_3$ ,  $Xs_5$ ,  $Xs_6$  и  $Xs_7$ ) в момент времени 0,2 мс.

Результаты имитационного моделирования показывают, что в случае отказа четырех модулей из семи (более половины от общего числа модулей в составе системы) элемент



**Рис. 5.** Диаграммы входных и выходных сигналов 7-канальных элементов выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов (ЭВСМ1, верхняя диаграмма) и без нее (ЭВСМ2, нижняя диаграмма) в случае отказа 3 модулей из 7 (входные сигналы  $X_{s1}$ - $X_{sN}$  обозначены прерывистой линией, выходные сигналы  $Out$  выделены жирными линиями)

**Fig. 5.** Input and output signal diagrams of 7-channel median signal selection elements with unused input exception function (ЭВСМ1, upper diagram) and without it (ЭВСМ2, lower diagram) in case of failure of 3 modules out of 7 (dashed line indicates  $X_{s1}$ - $X_{sN}$  input signals, bold lines indicate  $Out$  output signals)



**Рис. 6.** Диаграммы входных и выходных сигналов 7-канальных элементов выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов (ЭВСМ1, верхняя диаграмма) и без нее (ЭВСМ2, нижняя диаграмма) в случае отказа 4 модулей из 7 (входные сигналы  $X_{s1}$ - $X_{sN}$  обозначены прерывистой линией, выходные сигналы  $Out$  выделены жирными линиями)

**Fig. 6.** Input and output signal diagrams of 7-channel median signal selection elements with unused input exception function (ЭВСМ1, upper diagram) and without it (ЭВСМ2, lower diagram) in case of failure of 4 modules out of 7 (dashed line indicates  $X_{s1}$ - $X_{sN}$  input signals, bold lines indicate  $Out$  output signals)

выбора ЭВСМ2 выдает на выход *Out* сигнал с одного из четырех неиспользуемых входов. Это связано с тем, что система сообщает элементу выбора, что входы не используются путем подачи на них сигнала со значением -1 в связи с тем, что в данном случае неиспользуемых входов четыре, в выборке из семи значений появляется четыре значения -1, и это значение является медианным среди всех семи. Наблюдаемая реакция элемента выбора полностью соответствует заявленному алгоритму его работы и иллюстрирует его недостаток, заключающийся в том, что его нельзя использовать для построения СЭП КА, рассчитанных на отказ более половины модулей МСН в ее составе.

В то же время элемент ЭВСМ1 после отказа четырех модулей из семи продолжает передавать на выход медианный сигнал из трех оставшихся входных сигналов, что доказывает его способность обеспечивать работоспособность модульных СЭП КА при отказе более половины модулей.

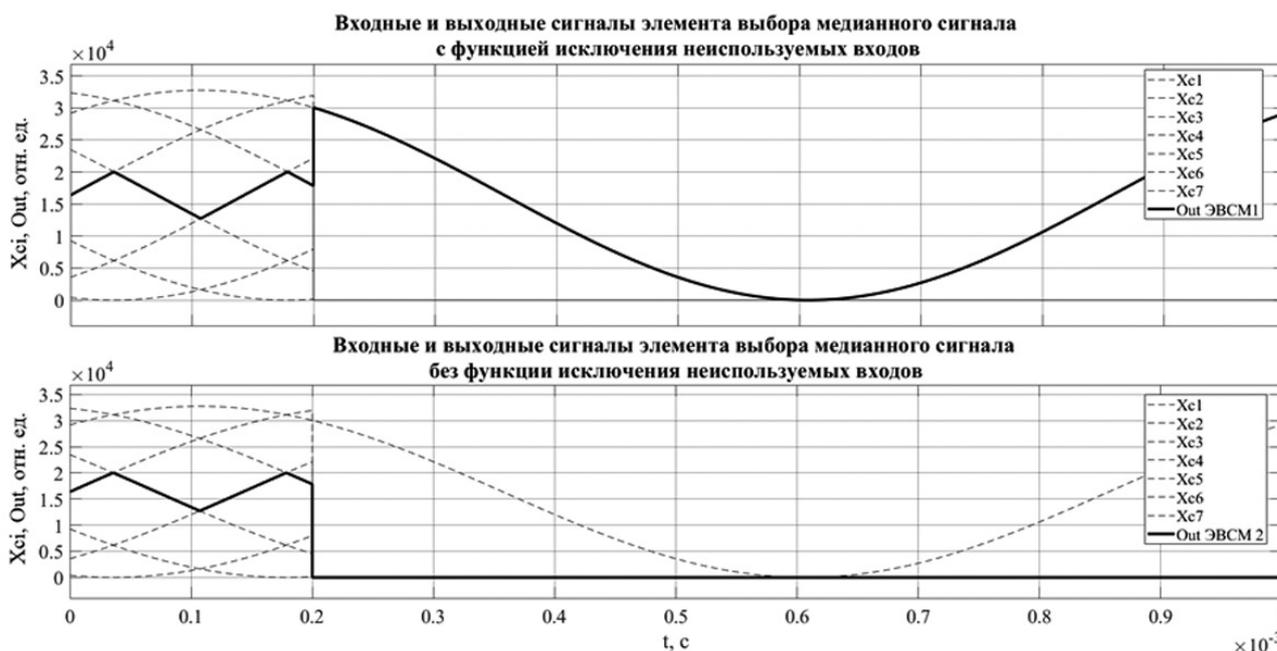
На рис. 7 представлены результаты имитационного моделирования элементов выбора медианного сигнала в случае отказа шести модулей (все модули, кроме модуля

2, которому соответствует сигнал  $X_{s2}$ ) в момент времени 0,2 мс.

Результаты имитационного моделирования, представленные на рис. 7, показывают, что элемент выбора ЭВСМ1, построенный по структуре, представленной на рис. 2, передает на выход единственный из оставшихся используемых входных сигналов при отказе шести модулей из семи ( $N-1$  модулей из  $N$ ). Это объясняется тем, что в выборке из одного сигнала этот сигнал и является медианным. Таким образом, элемент выбора по структуре, представленной на рис. 2, способен сохранять работоспособность модульных СЭП КА вплоть до отказа последнего модуля в их составе.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТА ВЫБОРА МЕДИАННОГО СИГНАЛА НА ПЛИС

Для проверки работоспособности разработанного элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов, его логическая схема по структуре, представленной на рис. 2, была реализована на ПЛИС Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7. При разработке кода на



**Рис. 7.** Диаграммы входных и выходных сигналов 7-канальных элементов выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов (ЭВСМ1, верхняя диаграмма) и без нее (ЭВСМ2, нижняя диаграмма) в случае отказа 6 модулей из 7 (входные сигналы  $X_{s1}$ - $X_{sN}$  обозначены прерывистой линией, выходные сигналы *Out* выделены жирными линиями)

**Fig. 7.** Input and output signal diagrams of 7-channel median signal selection elements with unused input exception function (ЭВСМ1, upper diagram) and without it (ЭВСМ2, lower diagram) in case of failure of 6 modules out of 7 (dashed line indicates  $X_{s1}$ - $X_{sN}$  input signals, bold lines indicate *Out* output signals)

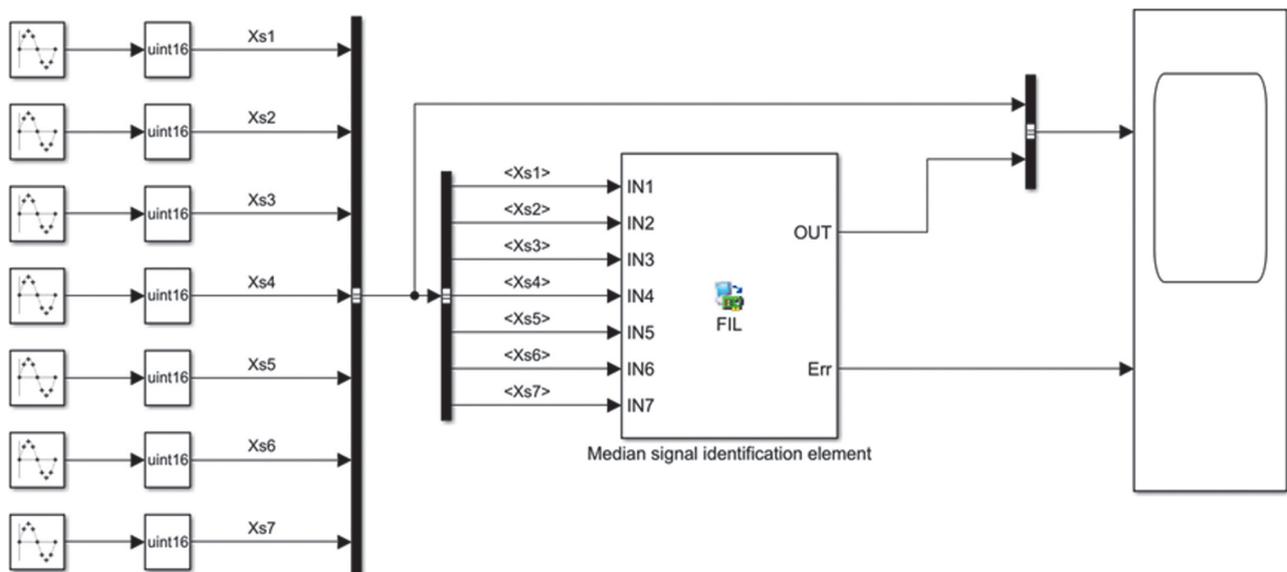
языке описания аппаратуры Verilog HDL для ПЛИС был использован модельно-ориентированный подход (МОП), одним из важнейших аспектов которого является применение инструментов автоматической генерации кода на основе модели разрабатываемой системы [20].

Применение МОП позволило использовать описанную выше имитационную модель элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов (ЭВМС1 на рис. 3) для автоматической генерации кода для ПЛИС Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7 [21]. Таким образом, на основе рассмотренной модели был получен IP-блок 7-канального элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов, занимающий 541 логическую ячейку ПЛИС. Таким образом, новый элемент выбора занимает в ПЛИС больше логических ячеек, чем реализация на ПЛИС аналога, описанного в [19], что обусловлено добавлением в структуру элемента нового блока исключения неиспользуемых входов. Однако, по сравнению с количеством доступных логических ячеек в современных ПЛИС, этот рост является незначительным. Кроме того, учитывая то, что (независимо от количества каналов  $N$  элемента выбора) для его работы требуется только один такой блок, и количество требуемых для его реализации

логических ячеек зависит от  $N$  линейно, данный элемент выбора, рассчитанный на большое количество каналов (25 и более) может быть реализован на современных ПЛИС.

Тестирование и отладка разработанного IP-блока проводились в среде Matlab Simulink с помощью технологии совместного моделирования FPGA (от англ. Field-Programmable Gate Array) in the loop (FIL, ПЛИС в контуре). Суть такой проверки заключается в том, что входными сигналами для IP-блока элемента выбора, загруженного на ПЛИС Altera Cyclone IV, являлись сигналы, сгенерированные в среде Simulink [22]. Результаты работы IP-блока передавались обратно в среду Simulink для их дальнейшей визуализации и обработки. Достоинством такого способа тестирования IP-блоков является отсутствие необходимости подготовки внешней схемы для проверки работоспособности блока. Проверка может производиться с помощью тех же имитационных моделей входных воздействий, которые использовались при разработке и тестировании имитационной модели самого элемента. На рис. 8 представлен внешний вид модели FIL.

На рис. 9 приведены диаграммы работы 7-канального элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов, реализованного на ПЛИС, при отказе четырех модулей из семи.



**Рис. 8.** Имитационная модель Matlab Simulink для совместного моделирования FPGA in the loop 7-канального элемента выбора медианного сигнала с исключением неиспользуемых входов на ПЛИС Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7

**Fig. 8.** Matlab Simulink simulation model for FPGA in the loop concurrent simulation of a 7-channel selection element of a median signal with unused input exception on the programmable logic integrated circuit Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7

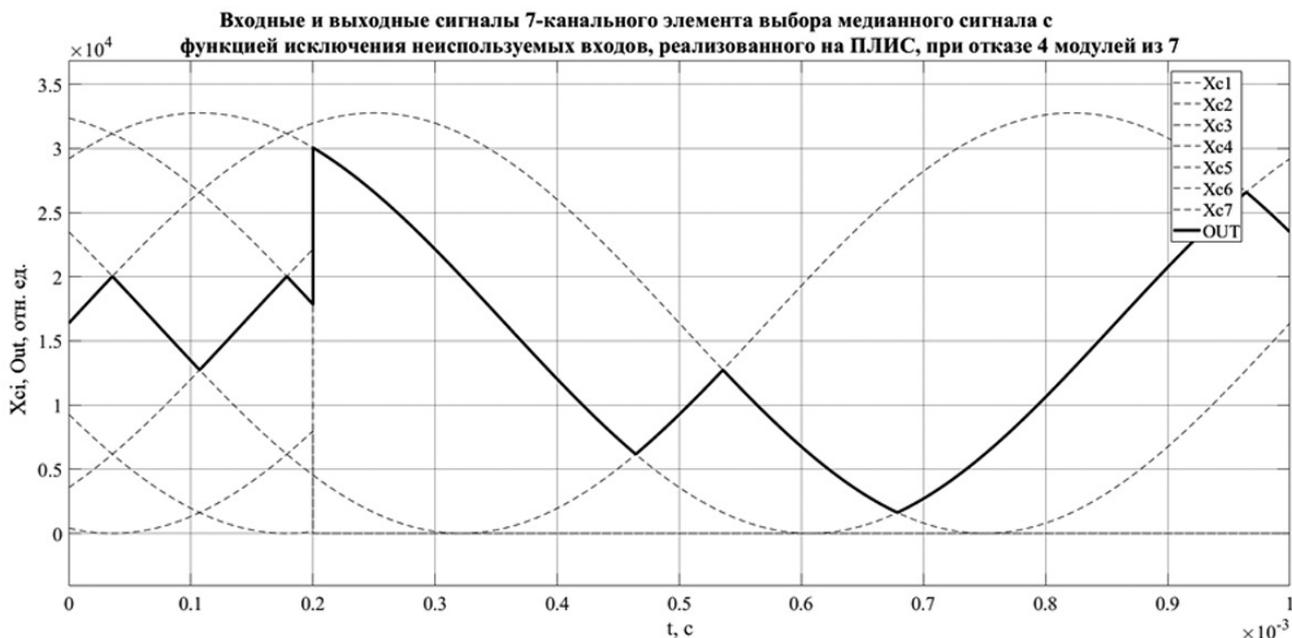


Рис. 9. Диаграммы работы 7-канального элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов, реализованного на ПЛИС Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7, при отказе 4 модулей из 7

Fig. 9. Operation diagrams of a 7-channel median signal selection element with unused input exception function implemented on the programmable logic integrated circuit Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7 FPGA for the case when 4 modules out of 7 fail

Диаграммы, приведенные на рис. 9, показывают, что работа предложенного элемента выбора на ПЛИС полностью соответствует описанному выше алгоритму. Данный элемент выбора обеспечивает определение медианного сигнала среди сигналов на используемых входах, даже если используется только один вход из  $N$ , что позволяет использовать предложенный элемент для разработки СЭП КА, к которым предъявляются повышенные требования по живучести.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная авторами и представленная в статье структура  $N$ -канального элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов может быть применена при построении высоконадежных резервированных СЭП КА с повышенными требованиями к живучести. Такой элемент выбора, в отличие от существующих аналогов, позволяет создать СЭП КА на базе унифицированных модулей стабилизации напряжения, способную сохранять работоспособность при отказе до последнего модуля в ее составе. Кроме того, на базе одного и того же  $N$ -канального элемента выбора с функцией исключения неиспользуемых входов, созданного по предложенной в данной

статье структуре, могут быть построены универсальные СЭП, рассчитанные на любое количество подключенных модулей от 1 до  $N$  без необходимости изменения конфигурации СЭП и самого элемента выбора при изменении количества модулей. Это достигается за счет того, что при отключении модуля от СЭП система автоматически понимает, что данный модуль отключен (по отсутствию данных, передаваемых этим модулем), и передает элементам выбора всех остальных модулей на соответствующий канал сигнал (имеющий значение -1), информирующий о том, что данный канал не используется.

Имитационное моделирование предложенного элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов подтвердило способность предложенной структуры выполнять заявленные в статье функции. Кроме того, в ходе имитационного моделирования были показаны преимущества предложенного элемента по сравнению с существующим аналогом, не имеющим функции исключения неиспользуемых входов. Было показано, что использование предложенного элемента выбора позволяет создавать модульные системы, сохраняющие работоспособность вплоть до отказа последнего модуля. Экспериментальное исследова-

ние разработанного с применением модельно-ориентированного подхода IP-блока предложенного элемента выбора медианного для

ПЛИС Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7 показало полное соответствие данного IP-блока его заявленной логике работы.

#### Список источников

1. Пат. № 2248041, Российская Федерация, G 06 G 7/25. Ранговый селектор / Д.В. Андреев; заявитель и патентообладатель Ульяновский государственный технический университет. № 2003133024/09. Заявл. 11.11.2003; опубл. 10.03.2005. Бюл. № 7.
2. Marcuccio S., Ullo S., Carminati M., Kanoun O. Smaller satellites, larger constellations: trends and design issues for earth observation systems // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2019. Vol. 34. Iss. 10. P. 50–59. <https://doi.org/10.1109/MAES.2019.2928612>.
3. Roberts T.G., Kaplan S. Space launch to low earth orbit: how much does it cost // Data repository, Center for Strategic and International Studies. 2022. Режим доступа: <https://aerospace.csis.org/data/space-launch-to-low-earth-orbit-how-much-does-it-cost/> (дата обращения: 29.09.2024).
4. McDowell J.C. The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX Starlink constellation // The Astrophysical Journal Letters. 2020. Vol. 892. No. 2. P. L36. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab8016>.
5. Henri Y. The OneWeb satellite system // Handbook of Small Satellites. Cham: Springer, 2020. P. 1091–1100. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20707-6\\_67-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20707-6_67-1).
6. Osoro O.B., Oughton E.J., Wilson A.R., Rao A. Sustainability assessment of low earth orbit (LEO) satellite broadband mega-constellations. 2023. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3325730/v1>.
7. Shaengchart Ya., Kraivanit T. The SpaceX Starlink satellite project: business strategies and perspectives // Corporate & Business Strategy Review. 2024. Vol. 5. Iss. 1. P. 30–37. <https://doi.org/10.22495/cbsrv5i1art3>.
8. Zhu Hong-yu, Bo-wen Zhang, Donglai Zhang. Overview of architectures for satellite's regulated bus power system // IEEE 1st China International Youth Conference on Electrical Engineering. 2020. <https://doi.org/10.1109/CIYCEE49808.2020.9332665>.
9. Апасов В.И. Унифицированный модуль системы электропитания малого космического аппарата // Решетневские чтения. 2016. Т. 1. С. 322–324. EDN: XEAFDJ.
10. Antuna A.L., Arias M., Miaja P.F., Villarejo J.A., Oliveira T.H., Fernández A. Modular converters analysis and design for the standardization of the power bus in satellites // 13th European Space Power Conference. 2023. <https://doi.org/10.1109/ESPC59009.2023.10298162>.
11. Апасов В.И. Исследование унифицированного силового модуля на основе комбинированного преобразователя напряжения // Сибирский журнал науки и технологий. 2016. Т. 17. № 4. С. 916–922.
12. Manoj K.M.B., Padmavathi K. Design and implementation of low power multi-output flyback converter for nano-satellite applications // First International Conference on Advances in Electrical, Electronics and Computational Intelligence. 2023. <https://doi.org/10.1109/ICAEECI58247.2023.10370982>.
13. Soubrier L., Trehet E. High power PCU for alphabus: PSR100V // 9th European Space Power Conference. 2011. Vol. 690.
14. Оскирко В.О., Сочугов Н.С., Павлов А.П. Модульный биполярный источник питания для мощных ионно-плазменных установок // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 5. С. 85. <https://doi.org/10.7868/S0032816214050127>. EDN: SKIAPX.
15. Kabirov V.A., Semenov V.D., Torgaeva D.S., Otto A.I. Miniaturization of spacecraft electrical power systems with solar-hydrogen power supply system // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48. Iss. 24. P. 9057–9070. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.087>.
16. Konstantinou G., Pou J., Ceballos S., Agelidis V.G. Active redundant submodule configuration in modular multilevel converters // IEEE transactions on power delivery. 2013. Vol. 28. Iss. 4. P. 2333–2341. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2264950>.
17. Пат. № 2204164, Российская Федерация, С1 G06G 7/25. Медианный идентификатор / Д.В. Андреев; заявитель Ульяновский государственный технический университет. № 2002110479/09. Заявл. 19.04.2002; опубл. 10.05.2003. Бюл. № 13.
18. Пат. № 2172516, Российская Федерация, С1 G06G 7/52. Ранговый фильтр / Д.В. Андреев; заявитель Ульяновский государственный технический университет. № 2000111009/09. Заявл. 28.04.2000; опубл. 20.08.2001. Бюл. № 23.
19. Пат. № 2804599, Российская Федерация, С1 G06G 7/25, H03H 17/02. Многоканальный элемент выбора одного из входных сигналов / В.А. Кабилов, К.А. Ахтырский, В.Д. Семенов, Д.С. Торгаева; заявитель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. № 2023102996. Заявл. 10.02.2023; опубл. 02.10.2023. Бюл. № 28.
20. Mudhivarthi B.R., Saini V., Dodia A., Shah P., Sekhar R. Model based design in automotive open system architecture // 7th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (Madurai, 17–19 May 2023). Madurai: IEEE, 2023. P. 1211–1216. <https://doi.org/10.1109/ICICCS56967.2023.10142603>.
21. Elsayed G., Kayed S.I. A comparative study between MATLAB HDL Coder and VHDL for FPGAs design and implementation // Journal of International Society for Science and Engineering. 2022. Vol. 4. Iss. 4. P. 92–98. <https://doi.org/10.21608/jisse.2022.136645.1056>.

22. Pereira L.F.S.C, Batista E.A., Pinto J.O.P., Upadhyaya B.R., Hines J.W., Coble J.B. Model predictive control for sodium fast reactors based on Laguerre functions and FPGA-in-the-loop environment // Nuclear Engineering and Design. 2022. Vol. 400. P. 112041. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.112041>.

### References

1. Andreev D.V. Rank selector. Patent RF, no. 2248041; 2005. (In Russ.).
2. Marcuccio S., Ullo S., Carminati M., Kanoun O. Smaller satellites, larger constellations: trends and design issues for earth observation systems. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2019;34(10):50-59. <https://doi.org/10.1109/MAES.2019.2928612>.
3. Roberts T.G., Kaplan S. Space launch to low earth orbit: how much does it cost. *Data repository, Center for Strategic and International Studies*. 2022. Available from: <https://aerospace.csis.org/data/space-launch-to-low-earth-orbit-how-much-does-it-cost/> [Accessed 29th September 2024].
4. McDowell J.C. The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX Starlink constellation. *The Astrophysical Journal Letters*. 2020;892(2):L36. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab8016>.
5. Henri Y. The OneWeb satellite system. In: *Handbook of Small Satellites*. Cham: Springer; 2020, p. 1091-1100. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20707-6\\_67-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20707-6_67-1).
6. Osoro O.B., Oughton E.J., Wilson A.R., Rao A. Sustainability assessment of low earth orbit (LEO) satellite broadband mega-constellations. 2023. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3325730/v1>.
7. Shaengchart Ya., Kraiwant T. The SpaceX Starlink satellite project: business strategies and perspectives. *Corporate & Business Strategy Review*. 2024;5(1):30-37. <https://doi.org/10.22495/cbsrv5i1art3>.
8. Zhu Hong-yu, Bo-wen Zhang, Donglai Zhang. Overview of architectures for satellite's regulated bus power system. In: *IEEE 1st China International Youth Conference on Electrical Engineering*. 2020. <https://doi.org/10.1109/CYCEE49808.2020.9332665>.
9. Apasov V.I. Unified system power module of small spacecraft. *Reshetnevskie chteniya*. 2016;1:322-324. (In Russ.). EDN: XEAFDJ.
10. Antuna A.L., Arias M., Miaja P.F., Villarejo J.A., Oliveira T.H., Fernández A. Modular converters analysis and design for the standardization of the power bus in satellites. In: *13th European Space Power Conference*. 2023. <https://doi.org/10.1109/ESPC59009.2023.10298162>.
11. Apasov V.I. Study of unified power unit based on combined voltage converter. *Vestnik of SibGAU*. 2016;17(4):916-922. (In Russ.).
12. Manoj K.M.B., Padmavathi K. Design and implementation of low power multi-output flyback converter for nano-satellite applications. In: *First International Conference on Advances in Electrical, Electronics and Computational Intelligence*. 2023. <https://doi.org/10.1109/ICAEECI58247.2023.10370982>.
13. Soubrier L., Trehet E. High power PCU for alphasat: PSR100V. In: *9th European Space Power Conference*. 2011;690.
14. Oskirko V.O., Sochugov N.S., Pavlov A.P. A modular bipolar power supply for high-power ion-plasma installations. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2014;5:85. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032816214050127>. EDN: SKIAPX.
15. Kabirov V.A., Semenov V.D., Torgaeva D.S., Otto A.I. Miniaturization of spacecraft electrical power systems with solar-hydrogen power supply system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(24):9057-9070. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.087>.
16. Konstantinou G., Pou J., Ceballos S., Agelidis V.G. Active redundant submodule configuration in modular multilevel converters. *IEEE transactions on power delivery*. 2013;28(4):2333-2341. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2264950>.
17. Andreev D.V. Median identifier. Patent RF, no. 2204164; 2003. (In Russ.).
18. Andreev D.V. Rank filter. Patent RF, no. 2172516; 2001. (In Russ.).
19. Kabirov V.A., Akhtyrskiy K.A., Semenov V.D., Torgaeva D.S. Multichannel element for selecting one of the input signals. Patent RF, no. 2804599; 2003. (In Russ.).
20. Mudhivarthi B.R., Saini V., Dodia A., Shah P., Sekhar R. Model based design in automotive open system architecture. In: *7th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems*. 17–19 May 2023, Madurai. Madurai: IEEE; 2023, p. 1211–1216. <https://doi.org/10.1109/ICICCS56967.2023.10142603>.
21. Elsayed G., Kayed S.I. A comparative study between MATLAB HDL Coder and VHDL for FPGAs design and implementation. *Journal of International Society for Science and Engineering*. 2022;4(4):92-98. <https://doi.org/10.21608/jisse.2022.136645.1056>.
22. Pereira L.F.S.C, Batista E.A., Pinto J.O.P., Upadhyaya B.R., Hines J.W., Coble J.B. Model predictive control for sodium fast reactors based on Laguerre functions and FPGA-in-the-loop environment. *Nuclear Engineering and Design*. 2022;400:112041. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.112041>.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ахтырский Кирилл Александрович**,  
аспирант,  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, Россия

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Kirill A. Akhtyrskiy**,  
Postgraduate,  
Tomsk State University of Control Systems  
and Radioelectronics,  
40, prospect Lenina, Tomsk 634050, Russia

✉ k.akhtirsky@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0001-1829-7282>

**Кабилов Вагиз Александрович,**  
к.т.н.,  
ассистент отделения электроэнергетики  
и электротехники,  
Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия  
kva@vipelec.com

**Семенов Валерий Дмитриевич,**  
к.т.н., старший научный сотрудник,  
профессор кафедры промышленной электроники,  
Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, Россия  
svd@ie.tusur.ru

**Торгаева Дарья Сергеевна,**  
к.т.н.,  
ведущий инженер-программист,  
Акционерное общество «Научно-производственная  
фирма «Микран»,  
634041, г. Томск, пр. Кирова, 51, Россия  
belial1349@mail.ru

#### Заявленный 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 07.11.2024 г.; одобрена после рецензирования 30.11.2024 г.; принята к публикации 02.12.2024 г.

✉ k.akhtirsky@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0001-1829-7282>

**Vagiz A. Kabirov,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Assistant of the Department of Electric Power  
and Electrical Engineering,  
Tomsk Polytechnic University,  
30, prospect Lenina, Tomsk 634050, Russia  
kva@vipelec.com

**Valeriy D. Semenov,**  
Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,  
Professor of the Department of Industrial Electronics,  
Tomsk State University of Control Systems and  
Radioelectronics,  
40, prospect Lenina, Tomsk 634050, Russia  
svd@ie.tusur.ru

**Darya S. Torgaeva,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Lead Software Engineer,  
Research and Production company Micran  
Joint Stock Company,  
51, prospect Kirova, Tomsk 634041, Russia  
belial1349@mail.ru

#### Authors' contribution

The authors contributed equally to the article.

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

#### Information about the article

The article was submitted 07.11.2024; approved after reviewing 30.11.2024; accepted for publication 02.12.2024.



## Применение микропроцессорного блока релейной защиты для диагностирования внутренних повреждений электрооборудования электроустановок

Д.М. Баннов<sup>1✉</sup>, В.И. Полищук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

<sup>2</sup>Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

**Резюме.** Цель – определить применимость стандартных микропроцессорных блоков релейной защиты и автоматики к получению цифрового сигнала токов для их математической обработки в вопросах диагностирования внутренних повреждений электрооборудования. В работе использовалась математическая обработка экспериментальных данных (временных рядов), основанная на аппроксимации регрессионным анализом в ортогональном базисе. При этом сравнивались весовые коэффициенты при базисных функциях в понимании векторов многомерного пространства, координатами которого они являлись, полученные по методу наименьших квадратов. В роли исследуемого сигнала выступает группа данных, полученных от натуральных экспериментов, проводимых с асинхронным двигателем, в котором имеется возможность создания искусственного внутреннего повреждения. Экспериментальные данные были получены на двух устройствах с разной частотой дискретизации и уровнем квантования. Первая группа данных получена на 12-тибитной PCI плате аналого-цифрового преобразователя для установки в персональный компьютер National Instruments 6024E при частоте дискретизации 10 кГц, вторая группа – на стандартизированном блоке микропроцессорной релейной защиты и автоматики при частоте дискретизации 2,4 кГц. Были получены критерии наличия внутреннего повреждения роторной цепи асинхронного двигателя, которое заметно не влияет на его работу, но снижает его энергетические характеристики, отличающиеся от неповрежденного состояния в 5 раз. Установлено, что предложенный способ выделения диагностического признака внутреннего повреждения электрооборудования электроустановок позволяет обнаружить изменение их электрических параметров на 3% от нормального состояния, не реагируя при этом на наличие электрической/механической нагрузки. Показано, что поведение диагностического признака оказалось одинаково свойственно при наличии внутреннего повреждения как при исследовании первой группы сигналов, так и при исследовании второй группы. Таким образом, подтверждена возможность получения цифрового сигнала от стандартизированных блоков релейной защиты приемлемой точности для обеспечения чувствительности диагностирования внутреннего повреждения электрооборудования электроустановок.

**Ключевые слова:** диагностика электрооборудования, обработка экспериментальных данных, метод регрессионного анализа, базисные функции

**Для цитирования:** Баннов Д.М., Полищук В.И. Применение микропроцессорного блока релейной защиты для диагностирования внутренних повреждений электрооборудования электроустановок // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 521–533. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-521-533>. EDN: WYCDQM.

### POWER ENGINEERING

#### Original article

## Application of a microprocessor-based relay protection unit for identifying internal faults of electrical equipment of electrical installations

Dmitry M. Bannov<sup>1✉</sup>, Vladimir I. Polishchuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Technical University, Samara, Russia

<sup>2</sup>Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

**Abstract.** We aim to determine the applicability of standard microprocessor units of relay protection and automatics for obtaining a digital signal of currents for their subsequent mathematical processing with the purpose

of identifying internal faults of electrical equipment. Mathematical processing of experimental data (time series) based on regression analysis approximation in orthogonal basis was carried out. To that end, the weight coefficients of basis functions obtained by the least squares method were compared in terms of multidimensional space vectors, corresponding to the coordinates of this space. The investigated signal was a data set obtained by field experiments conducted with an induction motor, which assumed the possibility of creating artificial internal damage. Experimental data were obtained using two devices with different sampling rates and quantization levels. The first set of data was obtained using a 12-bit PCI board of analog-to-digital converter for installation in a National Instruments 6024E PC at a sampling rate of 10 kHz. The second set of data was obtained using a standard block of microprocessor relay protection and automation at a sampling rate of 2.4 kHz. Indicators for the presence of internal damage to the rotor circuit of an induction motor, which reduces the motor energy characteristics without affecting its operation significantly, were determined. The indicators of the damaged and undamaged state differed by a factor of five. The proposed method for selecting the diagnostic sign of internal damage of electrical equipment of electrical installations detects a 3% deviation in their parameters from the normal state, ignoring the presence of electrical/mechanical load. The diagnostic sign was established to behave similarly in the presence of internal damage, in both sets of signals under study. Thus, the possibility of obtaining a digital signal of acceptable accuracy from standard relay protection units for ensuring reliable identification of internal faults of electrical equipment of electrical installations is confirmed.

**Keywords:** electrical equipment diagnostics, experimental data processing, regression analysis method, basis functions

**For citation:** Bannov D.M., Polishchuk V.I. Application of a microprocessor-based relay protection unit for identifying internal faults of electrical equipment of electrical installations. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):521-533. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-521-533>. EDN: WYCDQM.

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка методов обработки сигналов для мониторинга и диагностики состояния электрооборудования электроустановок является актуальной задачей для всех отраслей промышленности. Эффективная система диагностики на ранней стадии развития дефекта, базируемая на штатных средствах релейной защиты и автоматики, является основой для реализации программы по переходу с планово-предупредительных ремонтов на ремонты по результатам диагностики. Своевременная диагностика электрооборудования значительно снижает количество аварий на промышленных объектах [1]. С растущим уровнем автоматизации объектов электроэнергетики растет и потребность в расширении способов и методов обработки информационных сигналов.

Современные штатные устройства релейной защиты предоставляют уникальную возможность по интеграции алгоритмов в базовое программное обеспечение микропроцессорных блоков релейной защиты и автоматики (МБРЗА).

МБРЗА является электронно-вычислительной машиной, работающей на такой же топологии схемы компоновки, как и у персонального компьютера, и имеет схожий набор главных ее элементов (постоянное запоминающее устройство, оперативное запоминающее устройство, процессор, дискретные входы/выходы и др.). Не секрет, что МБРЗА

в режиме непрерывной работы загружен не на полную вычислительную мощность. Для реализации возможности непрерывного анализа сигналов штатными микропроцессорными устройствами возникает необходимость определения чувствительности существующих устройств аналого-цифрового преобразования (АЦП) к исследуемым изменениям сигналов от разных состояний электрооборудования. Поскольку наиболее перспективным способом диагностирования электрооборудования является анализ токов [2–8], разработка новых методов и внедрение в существующие устройства именно его является актуальной задачей как за рубежом, так и среди отечественных исследователей [9, 10].

В данной работе авторами предлагается апробировать штатное устройство МБРЗА на предмет его применимости к получению и дальнейшей математической обработке диагностических цифровых сигналов.

Представлена лабораторная установка, на которой реализован принцип физического моделирования внутреннего повреждения, представленного в виде обрыва стержня роторной цепи асинхронного двигателя, с возможностью восстановления в исходное состояние и имитации нагрузки на валу. В статье проведено сопоставление применения разработанного авторами метода математической обработки цифрового сигнала токов трехфазной цепи асинхронного двига-

теля, полученных при частоте дискретизации 10 кГц от лабораторного устройства и частоте дискретизации 2,4 кГц от типового МБРЗА.

Представлен диагностический признак, характеризующий наличие внутреннего повреждения (обрыва стержня) электрооборудования (асинхронного двигателя), полученный разработанным методом, показывающий свою работоспособность при использовании стандартного микропроцессорного блока релейной защиты. Предполагается, что фактическую реализацию новых методов в программном обеспечении МБРЗА возможно осуществить, применяя стандартные операторы того языка программирования, который реализован при составлении программного обеспечения используемого блока.

### **ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Провести натурный эксперимент на примере асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, имеющим возможность создавать внутреннее повреждение обмотки ротора. Режимы, в которых исследуется экспериментальный двигатель, должны соответствовать режимам работы реальных машин, находящихся в эксплуатации, таких как пусковой режим, режим холостого хода, установившийся режим нагрузки.

Получить цифровой сигнал токов во всех режимах работы и с наличием внутреннего повреждения от источников с разными характеристиками АЦП, на основе которого реализовать метод математической обработки для выявления диагностического признака наличия внутреннего повреждения.

Апробировать разработанный метод диагностирования внутренних повреждений на цифровых сигналах, полученных от разных АЦП с разной частотой дискретизации и уровнем квантования, и определить возможность его применения в стандартизированных устройствах автоматики и релейной защиты.

### **МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для выполнения работы и достижения поставленной цели авторами были решены следующие задачи:

– создана экспериментальная установка, отвечающая требованиям проведения натурального эксперимента, с наличием вну-

тренного повреждения, а также с возможностью восстановления машины в исходное состояние для обеспечения повторяемости эксперимента;

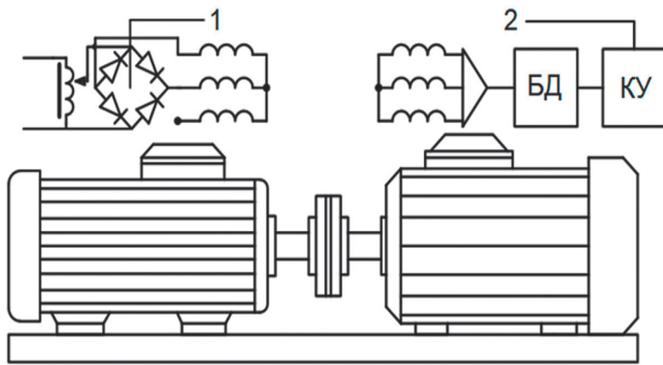
– получен адекватный цифровой сигнал фазных токов исследуемого электрооборудования на экспериментальной установке от разных устройств (от лабораторного 12-битного АЦП с частотой дискретизации 10 кГц и от штатного МБРЗА с частотой дискретизации 2,4 кГц);

– апробирован на лабораторном устройстве и на МБРЗА разработанный метод математической обработки полученных экспериментальных данных на основе существующих в большинстве языков программирования способов аппроксимации с целью выделения диагностического признака и сравнения разных состояний электрооборудования.

Решение первой задачи представляет собой соосную спарку из двух асинхронных двигателей (АД) с короткозамкнутым ротором, номинальной мощностью 3 кВт, один из которых применяется в качестве устройства, создающего тормозящий момент в режиме электродинамического тормоза, другой – испытуемый АД, в котором созданы условия внутреннего повреждения роторной цепи таким образом, чтобы можно было регулировать степень повреждения и восстанавливать ее в исходное неповрежденное состояние. Экспериментальная установка схематически и натурно представлена на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что на зажимы одного АД подается постоянный ток, что переводит его в режим электродинамического торможения, обеспечивая тем самым стабильность и равномерность тормозного момента, а также его одинаковость во всех экспериментах.

Для реализации повторяемости эксперимента был спроектирован и создан магнитопровод, конструктивно повторяющий магнитопровод заводского исполнения (количество стержней «беличьей клетки», наличие скоса пазов, диаметр, длина), в котором была реализована короткозамкнутая обмотка из медных проводников и короткозамыкающих колец, соединяемых методом пайки [11]. Данная конструкция была установлена на вал испытуемого АД вместо заводской активной части ротора (рис. 2).



**Рис. 1.** Экспериментальная установка: 1 – выпрямительный агрегат, питаемый от сети 220 В; 2 – трехфазная сеть, подключаемая к асинхронному двигателю через коммутационное устройство (КУ) и блок датчиков (БД)

**Fig. 1.** Experimental setup: 1 – 220V rectifier unit; 2 – three-phase network connected to the induction motor via a switching device (КУ) and a sensor unit (БД)

Из рис. 2 становится понятно, что внутреннее повреждение роторной цепи обеспечивается созданием физического разрыва между стержнем ротора и короткозамыкающим кольцом. При этом имеется возможность регулировать степень повреждения, отпаивая как один стержень, так и сразу несколько. Также очевидно, что данную конструкцию возможно восстановить в свое исходное состояние и многократно повторить эксперимент для того, чтобы убедиться в его адекватности.

Решением второй задачи является интеграция экспериментальной установки в си-

стему сбора данных, реализованную на базе персонального компьютера с платой АЦП National Instruments PSI 6024E. Источником эквивалентно-преобразованного сигнала токов статорной обмотки при этом являлись датчики Холла LEM HY 05 ... 25P, обеспечивающие гальваническую развязку между первичной токовой цепью и вторичной цепью измерения. Взаимодействие с данной системой происходит через программный пакет LabVIEW посредством виртуальных приборов. Панель виртуальных приборов представлена на рис. 3.

На рис. 3 представлена схема движения сигналов напряжения и фазного тока трех фаз испытуемого АД. Из него видно, что ток фаз А, В и С в процессе получения проходит ряд математических преобразований, таких как умножение на самого себя (возведение в квадрат), сложение и извлечение корня. Данные действия позволяют вместе с синусоидальными кривыми токов фаз получить модуль результирующего вектора токов статора по формуле (1). Сигналы напряжений в данном исследовании не применялись.

$$i_m(n) = \sqrt{i_A(n)^2 + i_B(n)^2 + i_C(n)^2}, \quad (1)$$

где  $i_{A, B, C}$  – мгновенные значения фазных токов, о.е.;  $n$  – номер отсчета.

Для апробации разработанного метода на сигналах, полученных от АЦП штатного МБРЗА к экспериментальной установке, последовательно питающей трехфазной сети, был подключен блок в составе лабораторного стенда (рис. 4).



**Рис. 2.** Ротор экспериментального асинхронного двигателя  
**Fig. 2.** Rotor of an experimental induction motor

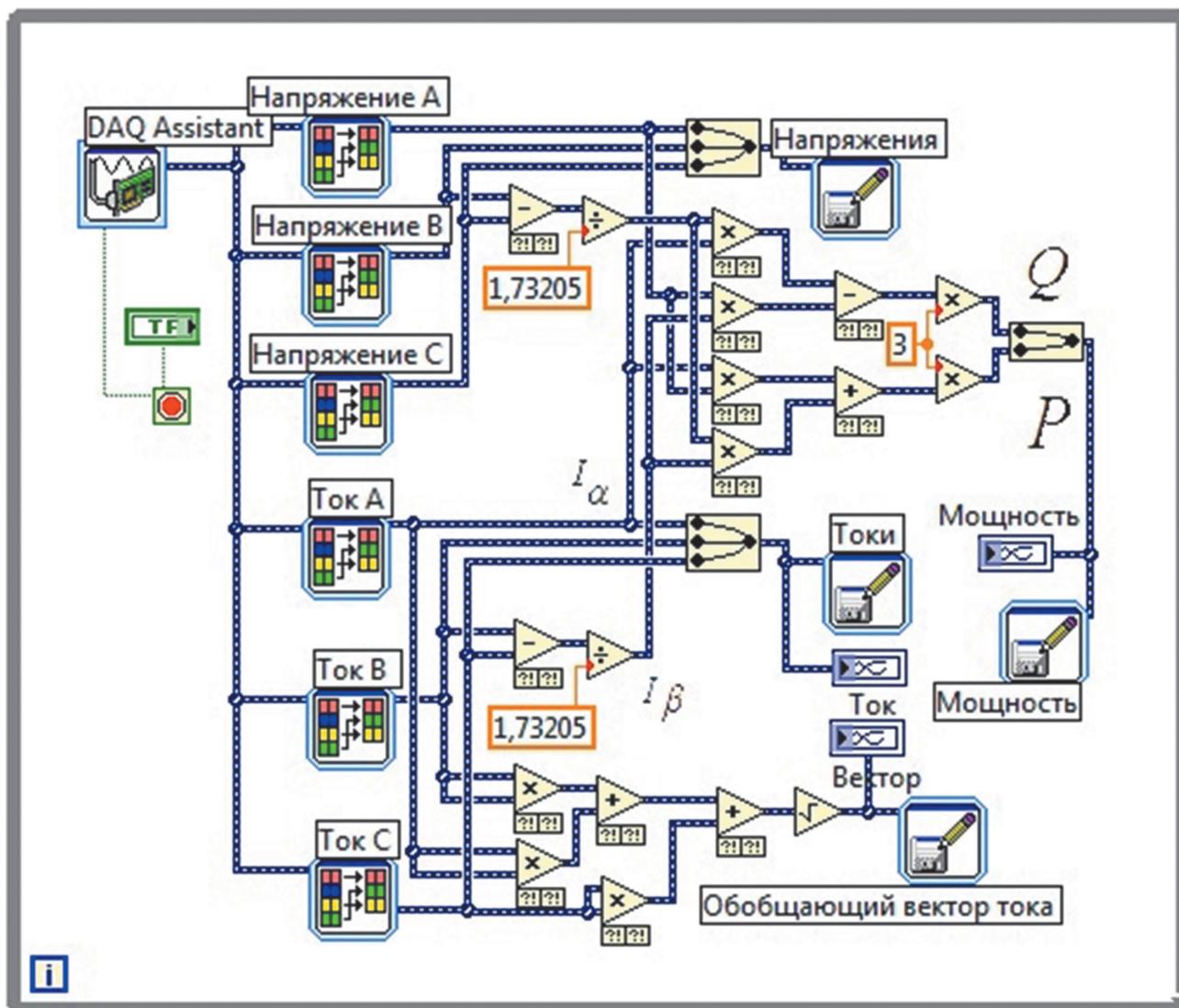


Рис. 3. Панель виртуальных приборов в LabView  
 Fig. 3. LabView virtual instruments panel



Рис. 4. Экспериментальная установка при получении сигнала токов статора от стандартизированного микропроцессорного блока релейной защиты и автоматики  
 Fig. 4. Experimental setup when receiving a stator current signal from the standardized microprocessor relay protection and automation unit

Согласно техническим характеристикам (табл. 1), к токовым цепям используемого микропроцессорного блока имеется возможность подключить силовую линию, питающую АД, напрямую, не применяя дополнительных трансформаторов тока. Взаимодействие штатного МБРЗА с персональным компьютером происходит через специализированное штатное программное обеспечение со свободным доступом.

Исходя из характеристик, представленных производителем в табл. 1, авторами сделан вывод, что к токовым цепям для целей исследования можно подключать токовые цепи высоковольтных трансформаторов тока от 0 до 5 А. Потребляемый ток АД экспериментальной установки согласно паспортным данным – 7 А, что для данного МБРЗА

**Таблица 1.** Характеристики аналоговых входов используемого МБРЗА<sup>3,4</sup>**Table 1.** Characteristics of analogue inputs of the used microprocessor relay protection and automation unit<sup>3,4</sup>

Наименование сигнала	Диапазон значений	Обозначение
Фазный ток	от 0,25 до 250,00 А	$I_{A,B,C}$
Ток нулевой последовательности	от 0,004 до 4,00 А	$3I_0$
Линейное напряжение фаз А, В и С от трансформатора напряжения (ТН)	от 2 до 260,00 В	$U_{AB,BC,CA}$
Напряжение нулевой последовательности от ТН	от 2 до 260,00 В	$3U_0$

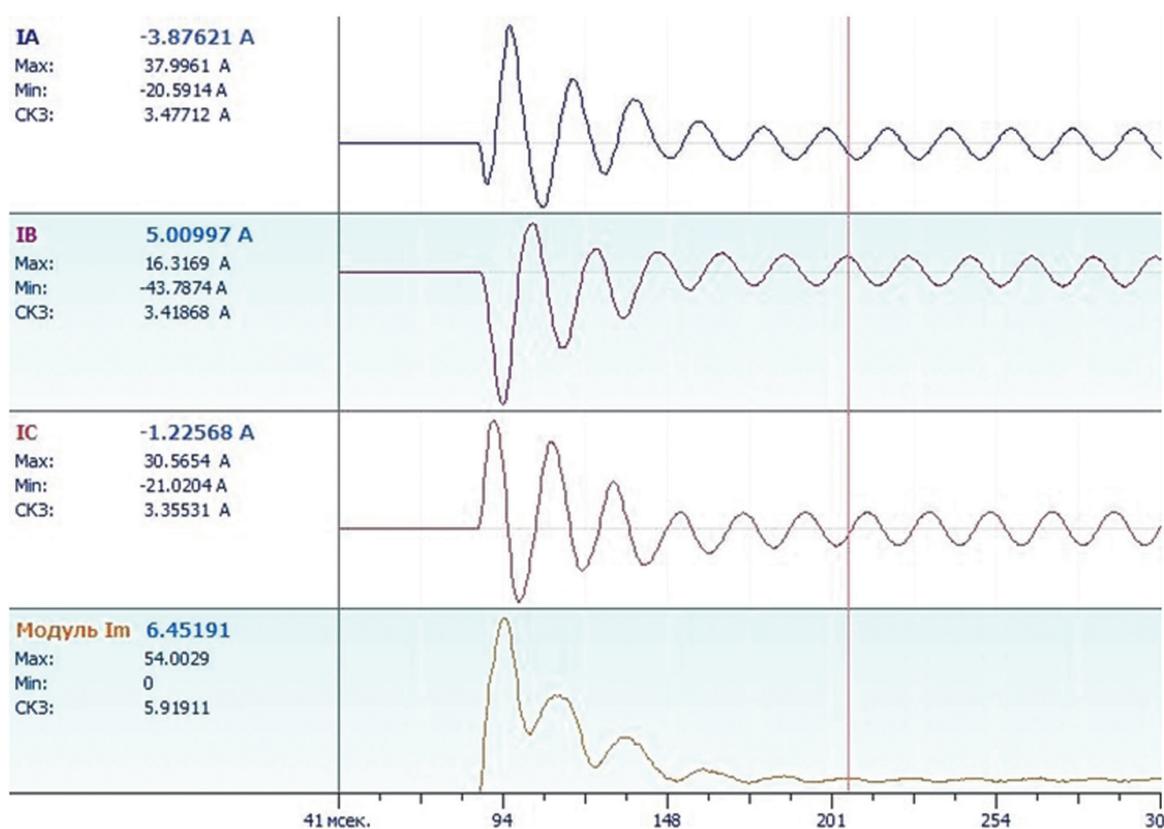
является значением с большим запасом, учитывая пусковые токи.

На рис. 5 представлен сигнал фазных токов статорной цепи, полученный от штатного МБРЗА при частоте дискретизации 2,4 кГц.

На рис. 5 помимо фазных токов в режиме пуска и холостого хода представлен также сигнал модуля результирующего вектора токов  $I_m$ , рассчитанный по (1) в специализи-

рованном штатном программном обеспечении.

Методом математической обработки получаемых сигналов является регрессионный анализ, представленный во всех языках программирования в виде готовых математических операторов. Обработке подвергались фрагменты сигналов холостого хода различного количества отсчетов  $n$  по следующей формуле<sup>5</sup> [13]:



**Рис. 5.** Сигналы фазных токов испытуемого асинхронного двигателя, полученные штатным микропроцессорным блоком релейной защиты и автоматики и рассчитанный по (1) сигнал модуля результирующего вектора токов

**Fig. 5.** Phase current signals of the tested induction motor received by the standard microprocessor relay protection and automation unit and calculated according to the resultant current vector modulus signal (1)

<sup>3</sup>Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-152-КЛ-53. Режим доступа: <https://www.mtrele.ru/files/filedoc/releynaya-zashita/bmrz-150/bmrz-152-kl-53.pdf> (дата обращения: 02.05.2024).

<sup>4</sup>Бушнев Д.В., Романов А.В. Теоретические основы цифровой обработки сигналов: учеб. пособ. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2005. 116 с.

<sup>5</sup>Вадутов О.С. Математические основы обработки сигналов: учебник и практикум для вузов. М.: Юрайт, 2024. 307 с.

$$\varphi(n) = A_0 + A_1 \cos(\omega n k_1) + B_1 \sin(\omega n k_1) + \dots + A_N \cos(\omega n k_N) + B_N \sin(\omega n k_N) \quad (2)$$

где  $A$  и  $B$  – весовые коэффициенты при базисных функциях;  $N$  – количество базисных функций;  $k$  – параметр, определяющий количество гармонических составляющих аппроксимационной модели.

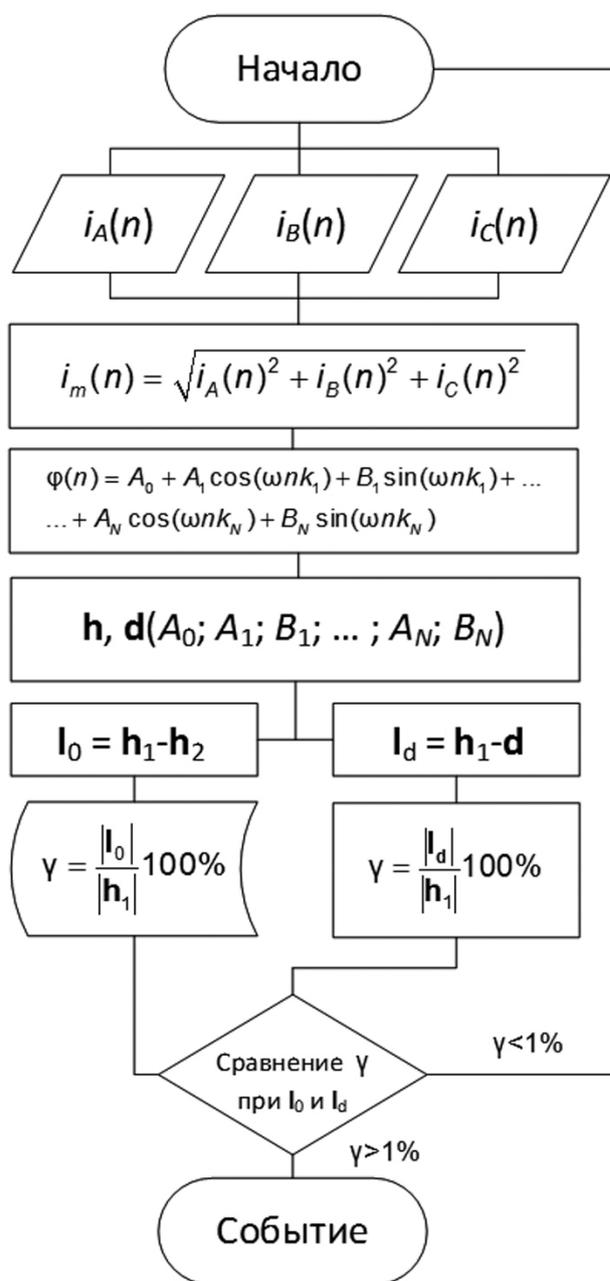
Как видно из формулы (2), в качестве базисных функций выбран характерный для гармонического сигнала Фурье базис<sup>6</sup> [14], что позволяет использовать свойство ортогональности косинуса и синуса для представления получаемых по методу наименьших квадратов весовых коэффициентов в качестве координат вектора.

Благодаря регрессии можно количественно и качественно анализировать изучаемые явления в сигналах и проводить их сравнение [15–17]. Поэтому дальнейшие математические операции с ними для определения разницы сигналов разного состояния можно производить по законам векторной алгебры<sup>7</sup> [18].

Чтобы сравнивать получаемые вектора весовых коэффициентов и выделять диагностический признак, авторами было введено несколько понятий: вектор неповрежденного состояния (с заведомо неповрежденным ротором)  $\mathbf{h}_1$ ; вектор неповрежденного состояния  $\mathbf{h}_2$ , аналогичный вектору неповрежденного состояния  $\mathbf{h}_1$ , но полученный при обработке другого участка сигнала; вектор поврежденных состояний (один, два, три, четыре обрыва стержня)  $\mathbf{d}_{1..4}$ ; вектор-разница  $\mathbf{l}_{0..4}$ , получаемый векторным вычитанием двух сравниваемых векторов  $\mathbf{h}_1$  и  $\mathbf{h}_2$ ,  $\mathbf{h}_1$  и  $\mathbf{d}_{1..4}$ . Для получения диагностического признака  $\gamma$  проводится сравнение модулей вектора-разницы исследуемого состояния  $|\mathbf{l}_{0..4}|$  и  $|\mathbf{h}_1|$  путем их деления. Диагностический признак  $\gamma$  измеряется в процентах:

$$\gamma = \frac{|\mathbf{l}_{0..4}|}{|\mathbf{h}_1|} 100\%, \quad (3)$$

где  $\mathbf{l}_0$  – вектор-разница векторов коэффициентов неповрежденного состояния  $\mathbf{h}_1$  и



**Рис. 6.** Схема работы предлагаемой системы диагностирования

**Fig. 6.** Operation diagram of the proposed diagnostic system

другого участка сигнала также неповрежденного состояния  $\mathbf{h}_2$ ,  $\mathbf{l}_{1..4}$  – четыре разных вектора коэффициентов поврежденного состояния (обрыв одного, двух, трех и четырех стержней). Данный метод был апробирован также на разных типах АД, разной мощности и разным количестве стержней «белочья клетка» в работе авторов [19]. Схема рабо-

<sup>6</sup>Дедус Ф.Ф., Панкратов А.Н., Куликова Л.И., Тетуев Р.К. Классические ортогональные базисы в задачах аналитического описания и обработки информационных сигналов: учеб. пособ. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2004. 168 с. EDN: QMNXPZ.

<sup>7</sup>Конеv В.В. Векторная алгебра: учеб. пособ. Томск: Томский политех. ун-т, 2008. 31 с.

ты предлагаемого метода диагностирования представлена на рис. 6.

Таким образом, проведя ряд натурных экспериментов, было получено семейство векторов весовых коэффициентов при базисных функциях во всех интересующих состояниях испытуемого АД: в целом состоянии, с обрывом одного стержня, двух, трех и четырех стержней. По описанной выше процедуре были проведены сравнения диагностического признака и сделан вывод о том, что представленный метод обладает чувствительностью, способной выявить разницу между сигналом целого состояния и с обрывом одного стержня. Также данный метод показывает свою работоспособность на сигналах, полученных от разных АЦП при разных частотах дискретизации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

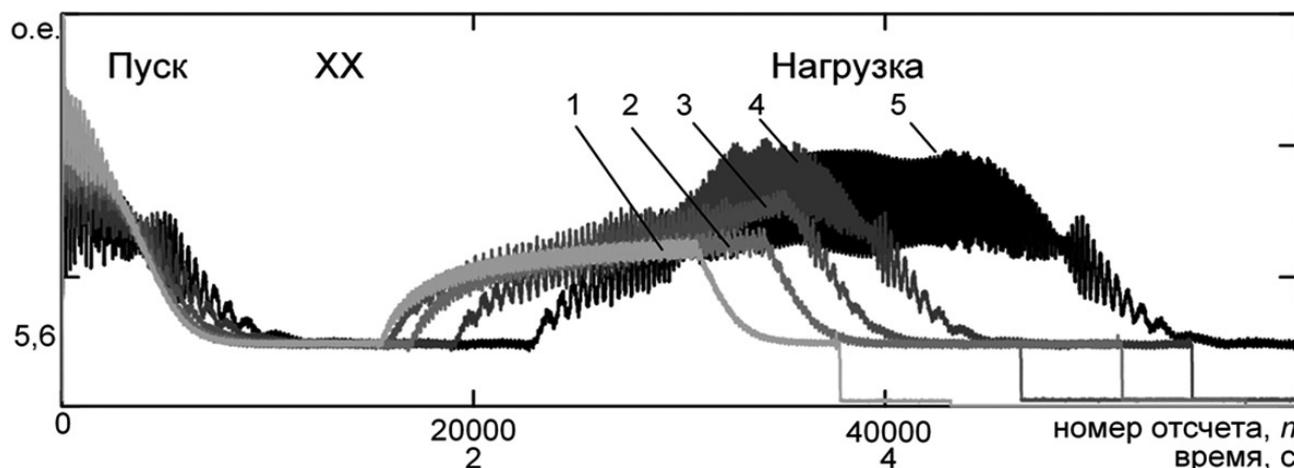
Метод математической обработки цифровых сигналов токовых цепей, являющийся основным элементом данного исследования, показал свою пригодность в вопросах

диагностирования при выполнении работ. Сигналы модуля результирующего вектора токов статора  $i_m$ , полученные при частоте дискретизации 10 кГц в исследуемых состояниях, на которых разрабатывался метод, представлены на рис. 7.

Из рис. 7 видно, как визуально отличаются кривые сигнала  $i_m$  в зависимости от степени внутреннего повреждения (неповрежденного состояния, обрыва одного, двух, трех и четырех стержней).

Проведение математической обработки экспериментальных данных методом аппроксимации по (2), выделение модулей векторов по (3), критериев для сравнения и получения диагностического признака по (4) для всех полученных экспериментальных отрезков данных проводилось в программном комплексе Mathcad. При этом использовался стандартный математический оператор регрессионного анализа по методу наименьших квадратов *linfit* [20].

Для получения более точных результатов и их проверки были обработаны и сравнены по два участка разного количества  $n$  (200 и 4000). Результаты представлены в табл. 2.



**Рис. 7.** Сигнал модуля результирующего вектора токов статора всего эксперимента во всех режимах: 1 – не поврежден, 2 – обрыв одного стержня, 3 – двух, 4 – трех, 5 – четырех стержней

**Fig. 7.** Signal of the stator current resultant vector modulus during the whole experiment in all modes: 1 – not damaged, 2 – one bar failure, 3 – two bar failure, 4 – three bar failure, 5 – four bar failure

**Таблица 2.** Результат обработки сигналов при 10 кГц

**Table 2.** Signal processing result at 10 kHz

Внутреннее повреждение	Диагностический признак $\gamma$ , %	
	При 200 $n$	При 4000 $n$
Нет повреждения	0,79	0,81
Обрыв 1-го стержня	4,24	4,67
Обрыв 2-х стержней	5,12	5,32
Обрыв 3-х стержней	5,84	5,98
Обрыв 4-х стержней	6,13	6,41

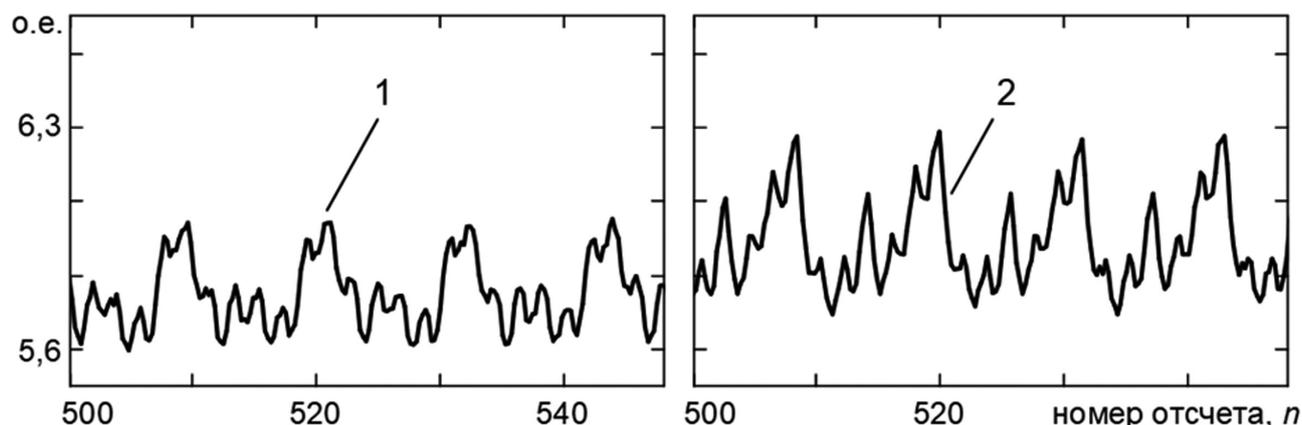


Рис. 8. Сигналы модуля результирующего вектора  $i_m$ , полученные на микропроцессорном блоке релейной защиты и автоматики: 1 – целое состояние, 2 – обрыв одного стержня

Fig. 8. Signals of the resultant vector  $i_m$  modulus received on the microprocessor relay protection and automation unit: 1 – undamaged state, 2 – one bar failure

Таблица 3. Результат обработки сигналов от микропроцессорного блока релейной защиты и автоматики при 2,4 кГц

Table 3. Result of processing signals from microprocessor relay protection and automation unit at 2.4 kHz

Внутреннее повреждение	Диагностический признак $\gamma$ , %	
	При 48 $n$	При 192 $n$
Нет повреждения	0,87	0,49
Обрыв 1-го стержня	3,94	3,9
Обрыв 2-х стержней	4,48	4,51
Обрыв 3-х стержней	4,96	4,93
Обрыв 4-х стержней	5,25	5,11

Сигналы модуля результирующего вектора  $i_m$ , полученные при частоте дискретизации 2,4 кГц от стандартного МБРЗА, размером 48  $n$  (один период 50 Гц) представлены на рис. 8.

Аналогично кривым сигнала  $i_m$  на рис. 7, такие же кривые рис. 8 тоже показывают тенденцию к увеличению уровня и появлению дополнительных гармонических составляющих.

Для получения более точных результатов и их проверки обработали и сравнили по два участка разного количества  $n$  (48 и 192). Результаты представлены в табл. 3.

Из табл. 2 и 3 видно, что диагностический признак с обрывом одного стержня значительно превышает такой же признак, но в целом состоянии – в несколько раз, благодаря чему чувствительность к внутреннему повреждению относительно общего количества стержней роторной цепи 28 составляет 3%. С повышением степени повреждения (два, три, четыре стержня) АД диагностический признак показывает тенденцию к возрастанию, что позволяет утверждать о

его применимости в вопросах диагностики внутренних повреждений электрооборудования. Все исследования проводились при двенадцати гармонических составляющих и базовой частоте 50 Гц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения исследования была создана экспериментальная установка с возможностью создания сложнодиагностируемого внутреннего повреждения электрооборудования. Отличительной особенностью является возможность восстанавливать его в исходное состояние для обеспечения повторяемости и проверки получаемых результатов.

Получен цифровой сигнал модуля результирующего вектора потребляемых токов от специализированного лабораторного 12-битного АЦП с частотой дискретизации 10 кГц и от штатного устройства микропроцессорной релейной защиты и автоматики с частотой дискретизации 2,4 кГц.

Апробирован разработанный метод математической обработки цифровых токовых

сигналов, основанный на регрессионном анализе в гармоническом базисе. При этом анализу подвергается сигнал модуля результирующего вектора токов статора, который в одном временном ряду содержит информацию по всем трем фазам, что сокращает временные и аппаратные затраты на диагностирование. Также полученный метод имеет гибкую систему адаптации под различные устройства АЦП и разные виды оборудования путем увеличения и уменьшения гармонического состава и применения других базисных функций.

Метод был применен для анализа сигнала, полученного при условиях, в которых регистрируются осциллограммы токов и напряжений в реальных условиях и при стандартном оборудовании. Из результатов видно, что ухудшение внутреннего состояния на 3%

в разы увеличивает исследуемый критерий и в целом состоянии с 0,87% становится 3,9%. Таким образом, определены возможность применения, дальнейшее развитие и внедрение методов математической обработки токовых сигналов в базовое программное обеспечение для диагностики повреждений средствами современной микропроцессорной релейной защиты и автоматики.

В развитии данного направления следует отметить применение других базисных функций при аппроксимации регрессионным анализом, соответствующих форме кривой исходного сигнала, что дает возможность исследовать сигнал не только установившихся режимов работы электрооборудования (холодный ход, равномерная нагрузка), но и переходных процессов (пуск, наброс нагрузки, снятие нагрузки).

#### Список источников

1. Литвинов С.Н., Лебедев В.Д., Гусенков А.В. Анализ методов контроля технического состояния оборудования на применимость к высоковольтным электронным измерительным трансформаторам // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 322–338. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-322-338>. EDN: TQSDVV.
2. Chisedzi L.P., Muteba M. Detection of broken rotor bars in cage induction motors using machine learning methods // Sensors. 2023. Vol. 23. Iss. 22. P. 9079–9087. <https://doi.org/10.3390/s23229079>.
3. Zhou Guangyang, Zhang Xiahui, Han Minxiao, Filizadeh S., Geng Zhi. Single-ended fault detection scheme using support vector machine for multi-terminal direct current systems based on modular multilevel converter // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2023. Vol. 11. Iss. 3. P. 990–1000. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2021.000404>. EDN: DKBSJP.
4. Bahgat B.H., Elhay E.A., Sutikno T., Elkholly M.M. Revolutionizing motor maintenance: a comprehensive survey of state-of-the-art fault detection in three-phase induction motors // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2024. Vol. 15. Iss. 3. P. 1968–1989. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i3.pp1968-1989>.
5. Bechiri M.B., Allal A., Naoui M., Khechekhouché A., Alsaif H. Effective diagnosis approach for broken rotor bar fault using Bayesian-based optimization of machine learning hyper parameters // IEEE Access. 2024. Vol. 12. Iss. 6. P. 139923–139936. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3464108>.
6. Kumar R.S., Indragandhi, V., Aljafari, B., Kareri, T. Rotor bar fault diagnosis in indirect field-oriented control-fed induction motor drive using Hilbert transform, discrete wavelet transform, and energy eigenvalue computation // Machines. 2023. Vol. 11. Iss. 7. P. 711. <https://doi.org/11.711.10.3390/machines11070711>.
7. Ghanbari T., Mehraban A. Stator winding fault detection of induction motors using fast Fourier transform on rotor slot harmonics and least square analysis of the Park's vectors // IET Electric Power Applications. 2023. Vol. 18. Iss. 7. P. 356–366. <https://doi.org/10.1049/elp2.12394>.
8. Ameid T., Ammar A., Talhaoui H., Azzoug Yo. An automatic rotor bar fault diagnosis using fuzzy logic and DWT-energy for backstepping control driven induction motor in low-speed operation // Soft Computing. 2023. Vol. 27. Iss. 15. P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08443-y>.
9. Курилин С.П. Методы тестирования технического состояния асинхронных электродвигателей в процессе эксплуатации // Вестник Московского энергетического института. 2022. № 6. С. 11–20. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-6-11-20>.
10. Хальясмаа А.И., Ревенков И.С., Сидорова А.В. Применение технологии цифрового двойника для анализа и прогнозирования состояния трансформаторного оборудования // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 3. С. 99–113. EDN: WEXWZR.
11. Баннов Д.М., Крицкий М.В. Разработка экспериментальной установки для исследований диагностических признаков повреждения короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя // Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: матер. IX Междунар. молодежной науч.-техн. конф. (г. Казань, 1–5 октября 2018 г.). Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2018. Т. 3. С. 237–238. EDN: ZAXFDV.
12. Шахнович Д.И. Разработка программно-технической среды для испытаний устройств релейной защиты на базе терминала БМРЗ-51 производства НТЦ «Механотроника» // Проблемы геологии и освоения недр: тр. XXVIII

- Международного молодежного науч. симпозиума им. акад. М.А. Усова, посвященного 125-летию со дня рождения академика Академии наук СССР, профессора К.И. Сатпаева и 130-летию со дня рождения члена-корреспондента Академии наук СССР, профессора Ф.Н. Шахова (г. Томск, 1–5 апреля 2024 г.). Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. С. 231–233. EDN: VJDKXQ.
13. Дрейпер Г., Смит Д. Прикладной регрессионный анализ: пер. с англ. 3-е изд. М.: Диалектика, 2017. 912 с.
  14. Мартюгин С.А., Поршнева С.В. О возможности повышения помехозащищенности телекоммуникационных систем с OFDM с помощью дробного преобразования Фурье // *International Journal of Open Information Technologies*. 2024. Т. 12. № 7. С. 71–79. EDN: UXUJDT.
  15. Гришаев Д.А., Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б. Обработка экспериментальных результатов суперкавитационного обтекания конуса методом локальной полиномиальной регрессии (LOESS) // *iPolytech Journal*. 2023. Т. 27. № 3. С. 518–526. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-518-526>. EDN: WOSBCK.
  16. Pramesti W., Damayanti I., Asfani D. Stator fault identification analysis in induction motor using multinomial logistic regression // *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications*. 2016. P. 439–442. <https://doi.org/10.1109/ISITIA.2016.7828700>.
  17. Chao Zhao. Trend analysis of rotor-to-stator impact-rub based on smooth support vector regression // *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2014. Vol. 50. Iss. 3-4. P. 243. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2014.066735>.
  18. Топонен Н.А., Геворкян М.Н. Реализация трёхмерной проективной геометрической алгебры на высокоуровневом языке программирования // *Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: матер. Всерос. конф. с междунар. участием* (г. Москва, 17–21 апреля 2023 г.). М.: Российский университет дружбы народов, 2023. С. 240–245. EDN: XHDQSK.
  19. Баннов Д.М., Полищук В.И. Метод обработки сигналов токов статора асинхронного двигателя для диагностики обрыва стержня ротора // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2024. № 4. С. 64–72. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2024.4.064-072>. EDN: BTWJEE.
  20. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании: монография. М.: СОЛОН-Пресс, 2008. 576 с.

### References

1. Litvinov S.N., Lebedev V.D., Gusenkov A.V. Analysis of methods for monitoring the technical condition of high-voltage electronic measuring transformers. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):322-338. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-322-338>. EDN: TQSDVV.
2. Chisedzi L.P., Muteba M. Detection of broken rotor bars in cage induction motors using machine learning methods. *Sensors*. 2023;23(22):9079-9087. <https://doi.org/10.3390/s23229079>.
3. Zhou Guangyang, Zhang Xiaohui, Han Minxiao, Filizadeh S., Geng Zhi. Single-ended fault detection scheme using support vector machine for multi-terminal direct current systems based on modular multilevel converter. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2023;11(3):990-1000. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2021.000404>. EDN: DKBSJP.
4. Bahgat B.H., Elhay E.A., Sutikno T., Elkholy M.M. Revolutionizing motor maintenance: a comprehensive survey of state-of-the-art fault detection in three-phase induction motors. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2024;15(3):1968-1989. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i3.pp1968-1989>.
5. Bechiri M.B., Allal A., Naoui M., Khechekhouche A., Alsaif H. Effective diagnosis approach for broken rotor bar fault using Bayesian-based optimization of machine learning hyper parameters. *IEEE Access*. 2024;12(6):139923-139936. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3464108>.
6. Kumar R.S., Indragandhi, V., Aljafari, B., Kareri, T. Rotor bar fault diagnosis in indirect field-oriented control-fed induction motor drive using Hilbert transform, discrete wavelet transform, and energy eigenvalue computation. *Machines*. 2023;11(7):711. <https://doi.org/10.3390/machines11070711>.
7. Ghanbari T., Mehraban A. Stator winding fault detection of induction motors using fast Fourier transform on rotor slot harmonics and least square analysis of the Park's vectors. *IET Electric Power Applications*. 2023;18(7):356-366. <https://doi.org/10.1049/elap2.12394>.
8. Ameid T., Ammar A., Talhaoui H., Azzoug Yo. An automatic rotor bar fault diagnosis using fuzzy logic and DWT-energy for backstepping control driven induction motor in low-speed operation. *Soft Computing*. 2023;27(15):1-16. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08443-y>.
9. Kurilin S.P. Induction motors technical condition in-service testing methods. *Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2022;6:11-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-6-11-20>.
10. Khalyasmaa A.I., Revenkov I.S., Sidorova A.V. Application of digital twin technology for analysis and prediction state of power transformer equipment. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*. 2022;14(3):99-113. (In Russ.). EDN: WEXWZR.
11. Bannov D.M., Bannov D.M., Krickij M.V. Development of an experimental setup for studying diagnostic signs of damage to a short-circuited rotor winding of an induction motor. In: *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2018: materialy IX Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii = Electric Power Industry through the Eyes of Youth – 2018: Proceedings of the 9<sup>th</sup> International youth scientific and technical conference*.

1–5 October 2018, Kazan'. Kazan': Kazan State Power Engineering University; 2018, vol. 3, p. 237-238. (In Russ.). EDN: ZAXFDV.

12. Shakhnovich D.I. Development of a software and hardware environment for testing relay protection devices based on the microprocessor relay protection and automation terminal manufactured by the Mechatronic Research Centre. In: *Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy XXVIII Mezhdunarodnogo molodezhnogo nauchnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova, posvyashchennogo 125-letiyu so dnya rozhdeniya akademika Akademii nauk SSSR, professora K.I. Satpaeva i 130-letiyu so dnya rozhdeniya chlena-korrespondenta Akademii nauk SSSR, professora F.N. Shahova = Problems of Geology and Subsoil Development: Proceedings of the 28<sup>th</sup> International Youth Scientific Symposium named after the Academician M.A. Usov dedicated to the 125<sup>th</sup> birth anniversary of the Academician of the USSR Academy of Sciences, Professor K.I. Satpaev and the 130<sup>th</sup> birth anniversary of the Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences, Professor F.N. Shakhov.* 1–5 April 2024, Tomsk. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2024, p. 231-233. (In Russ.). EDN: BJDXXQ.

13. Draper G., Smith D. Applied regression analysis. New York: John Wiley & Sons; 1981. (Russ. ed.: *Prikladnoj regressionnyj analiz.* Moscow: Dialektika; 2017, 912 p.)

14. Martyugin S.A., Porshnev S.V. On the possibility of increasing the noise immunity of OFDM telecommunication systems using fractional Fourier transforms. *International Journal of Open Information Technologies.* 2024;12(7):71-79. (In Russ.). EDN: UXUJDT.

15. Grishaev D.A., Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B. Processing of experimental results for super-cavitating flow past cone by local polynomial regression (LOESS). *iPolytech Journal.* 2023;27(3):518-526. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-518-526>. EDN: WOSBCK.

16. Pramesti W., Damayanti I., Asfani D. Stator fault identification analysis in induction motor using multinomial logistic regression. In: *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications.* 2016;439-442. <https://doi.org/10.1109/ISITIA.2016.7828700>.

17. Chao Zhao. Trend analysis of rotor-to-stator impact-rub based on smooth support vector regression. *International Journal of Computer Applications in Technology.* 2014;50(3-4):243. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2014.066735>.

18. Toponen N.A., Gevorkyan M.N. Implementation of three-dimensional projective geometric algebra in a high-level programming language. In: *Informacionno-telekommunikacionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie vysokotekhnologichnyh sistem: materialy Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Information and telecommunication technologies and mathematical modeling of high-tech systems: Proceedings of All-Russian Conference with international participation.* 17–21 April 2023, Moscow. M.: Peoples' Friendship University of Russia; 2023, p. 240-245. (In Russ.). EDN: XHDQSK.

19. Bannov D.M., Polishchuk V.I. Method of processing signals of stator currents of induction motor to diagnose broken rotor bar. *Vestnik of the Ivanovo State Power Engineering University.* 2024;4:64-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2024.4.064-072>. EDN: BTWJEE.

20. D'yakonov V.P. *MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 in mathematics and modeling.* Moscow: SOLON-Press; 2008, 576 p. (In Russ.).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### **Баннов Дмитрий Михайлович,**

к.т.н.,  
старший преподаватель  
кафедры электрических станций,  
Самарский государственный технический университет,  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244,  
Россия  
✉ [bannov.dm@samgtu.ru](mailto:bannov.dm@samgtu.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-5507-2798>

##### **Полищук Владимир Иосифович,**

д.т.н., профессор,  
профессор Политехнической школы,  
Югорский государственный университет,  
628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16, Россия  
[polischuk\\_vi@mail.ru](mailto:polischuk_vi@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-8100-4406>

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### **Dmitry M. Bannov,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Lecturer of the  
Electric Power Plant Department,  
Samara State Technical University,  
244, Molodogvardeiskaya St., Samara 443100, Russia  
✉ [bannov.dm@samgtu.ru](mailto:bannov.dm@samgtu.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-5507-2798>

##### **Vladimir I. Polishchuk,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Polytechnical School,  
Yugra State University,  
16, Chekhov St., Khanty-Mansiysk 628012, Russia  
[polischuk\\_vi@mail.ru](mailto:polischuk_vi@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-5507-2798>

**Заявленный 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 05.11.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.11.2024 г.; принята к публикации 27.11.2024 г.

**Authors' contribution**

The authors contributed equally to the article.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

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

**Information about the article**

The article was submitted 05.11.2024; approved after reviewing 25.11.2024; accepted for publication 27.11.2024.

## POWER ENGINEERING

Original article

EDN: GGTPUI

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-534-549



## Green energy systems for powering electric vehicles considering telecommunication system with case study of Pakistan

Muhammad Bilal Ali<sup>1✉</sup>, Syed Ali Abbas Kazmi<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>National University of Sciences and Technology, Islamabad, Pakistan

**Abstract.** The objective is to analyze the sustainability and efficiency of Pakistan's telecommunication sector by developing a framework for base transceiver stations integrating renewable energy and charging stations. Various renewable energy sources such as solar, wind, biomass and hydropower were considered as the object of research. The following methodological steps were implemented in this work: site analysis; determination of optimal sizing of plants, energy storage systems and electric vehicle charging stations; cost-benefit analysis methods; greenhouse gas emissions estimation; and system design methods for integrating selected renewable energy sources and energy storage solutions, taking into account the operational requirements of the base transceiver stations. It is found that switching to hybrid renewable energy systems can significantly reduce dependence on diesel generators. It is shown that operating costs can be reduced by more than 80% compared to conventional diesel-fueled systems. Also, the introduction of hybrid renewable energy sources can lead to significant reductions in CO<sub>2</sub> emissions. The integration of battery storage systems has been shown to improve the reliability of energy supply by ensuring uninterrupted operation during periods of high demand and blackouts. The proposed structure scheme for base transceiver stations is designed to accommodate future growth in the share of electric vehicles and technological advancements in renewable energy and electric vehicle charging. By prioritizing the integration of renewable technologies along with charging station infrastructure, telecom service providers in Pakistan can reduce their carbon footprint and operational costs. This approach not only addresses the unpredictability of the electricity grid, especially in rural areas, but also positions the telecoms sector as an active participant in global efforts to combat climate change.

**Keywords:** electric vehicle charging stations, base transceiver stations, battery storage system, technical, economic and environmental assessment, renewable framework

**For citation:** Bilal Ali M., Abbas Kazmi S.A. Green energy systems for powering electric vehicles considering telecommunication system with case study of Pakistan. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):534-549. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-534-549>. EDN: GGTPUI.

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.31

## Зелёные энергетические системы для электромобилей с учётом телекоммуникационной системы на примере Пакистана

Мухаммед Билал Али<sup>1✉</sup>, Сайед Али Аббас Казми<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Национальный университет наук и технологий, Исламабад, Пакистан

**Резюме.** Цель – анализ устойчивости и эффективности телекоммуникационного сектора Пакистана путем разработки структуры для базовых приемопередающих станций, объединяющих возобновляемые источники энергии и зарядные станции. В качестве объекта исследований рассматривались различные возобновляемые источники энергии, такие как солнце, ветер, биомасса и гидроэнергия. В работе реализованы следующие методологические этапы: анализ местности; определение оптимальных размеров установок, систем накопителей энергии и станций зарядки электромобилей; методы анализа затрат и выгод; оценка выбросов парниковых газов; методы проектирования системы для интеграции выбранных возобновляемых источников энергии и решений по хранению энергии с учетом эксплуатационных требований базовых приемопередающих станций. Установлено, что переход на гибридные системы возобновляемой энергии может значительно снизить зависимость от дизельных генераторов. Показано, что эксплуатационные расходы могут быть снижены более чем на 80% по сравнению с традиционными системами, работающими на дизельном топливе. Также внедрение гибридных возобновляемых источников энергии может привести к значительному сокращению выбросов CO<sub>2</sub>. Показано,

что интеграция систем хранения аккумуляторов повышает надёжность энергоснабжения, обеспечивая бесперебойную работу в периоды высокого спроса и отключения электроэнергии. Предложенная схема структуры для базовых приемопередающих станций разработана с учетом будущего роста доли электротранспорта и технологических достижений в области возобновляемых источников энергии и зарядки электромобилей. Отдавая предпочтение интеграции возобновляемых технологий наряду с инфраструктурой зарядных станций, поставщики телекоммуникационных услуг в Пакистане могут сократить углеродный след и эксплуатационные расходы. Такой подход не только решает проблемы, связанные с непредсказуемостью электросетей, особенно в сельских регионах, но и позиционирует телекоммуникационный сектор как активного участника глобальных усилий по борьбе с изменением климата.

**Ключевые слова:** зарядные станции электромобилей, базовые приемопередатчики, накопители энергии, технико-экономическая и экологическая оценка, возобновляемые источники энергии

**Для цитирования:** Билал Али Мухаммед, Аббас Казми Сайед Али. Зелёные энергетические системы для электромобилей с учётом телекоммуникационной системы на примере Пакистана. *iPolytech Journal*. 2024. Т. 28. № 4. (In Eng.). С. 534–549. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-534-549>. EDN: GGTPUI.

## INTRODUCTION

A key element of economic growth and development is electricity. Consequently, a nation's ability to use energy is a must for its development. The telecom industry needs electricity to deliver reliable services to potential customers. The significant increase in the use of wireless communication networks in recent years is supported by a number of indicators, including the COVID-19 pandemic. Since many businesses and organizations now want their employees to work from home or finish their coursework online, wireless communication is more crucial than ever in the modern world. Man-made greenhouse gas emissions need to be decreased in light of the growing body of evidence demonstrating the effects of climate change on a global scale [1].

Cellular network operators must construct more telecommunication towers to meet the growing demand for telecom services in order to improve transmission and provide extensive coverage [2]. In rural areas with unpredictable grid electricity, telecom companies have challenges. Diesel generators (DG) are required when demand is high, increasing CO<sub>2</sub> (GHG) emissions and exacerbating the effects of global warming. Renewable energy sources like solar, wind, biomass, hydro, and tidal are essential for driving telecom towers [2]. Diesel oil accounts for over 80% of energy costs for off-grid tower locations, making it the main expense. Effective design, upkeep, and technical development are crucial for the highest return on investment, accounting for factors such as emissions, energy efficiency, and operational scenarios [3].

Two tactics to assist reduce global warming include promoting energy-efficient devices

and raising consciousness of the consequence of reducing power consumption in hometowns and the telecom industry. Numerous scholars are trying to find solutions to these problems in different ways. Promoting renewable energy resources is the most reliable, cost-effective, environmentally pleasant, and well-liked alternate strategy. In an attempt to improve long-term energy supply systems, a lot of emphasis has been paid to the development of different renewable energy sources. Hybrid renewable energy sources (HRES) are dependable, carbon dioxide-free systems that successfully lessen dependency on a single renewable resource in areas with limited natural resources [4]. Integrating renewable energy sources is an emission-free method of producing energy that supports a district's geography and functions as a dependable prospective energy source for remote generating applications, claim [5, 6]. Large-scale wind, solar, and residential PV installations are all comprised in the renewable energy capacity shown. The production collects extra power from the grid throughout the day and releases it at night since most residential PV systems are on-grid systems. HRES can be operated individually for each household or in microgrids (MGs), that link many homes to create a power grid, in remote areas wherever grid extension is not practical [7–9]. The recent literature is shown in Table 1.

Interest in HRES has increased as a result of the fast-increasing demand for energy, environmental concerns, the depletion of fossil resources, fluctuating energy prices, and the need to power off-grid equipment. However, cultural, economic, environmental, and technical factors need to be taken

**Table 1.** Recent works on technical, economic and environmental assessment**Таблица 1.** Последние работы по технико-экономической и экологической оценке

No.	Location	BTS sites	Method	Technical characteristic components					Objective functions and explicitly considered variables				Load type
				PV	WE	DG	EV	BA	LCOE	IRR	ROI	SA	
1	Australia [10]	×	HOMER	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	×	✓	IL
2	Cameroon [11]	×	HOMER	✓	✓	✓	×	×	✓	✓	×	×	DOMS
3	Iran [12]	×	IGOA	✓	✓	×	×	✓	✓	×	×	✓	COM
4	India [13]	×	HOMER	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	×	✓	DOM
5	Nigeriya [14]	×	HOMER	✓	✓	×	×	✓	✓	×	×	✓	DOM
6	India [15]	×	HOMER	✓	✓	×	×	✓	✓	×	×	✓	AGR
7	India [16]	×	HOMER	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	×	✓	RSD
8	Pakistan [17]	×	HOMER	✓	✓	×	×	✓	✓	×	×	✓	COM
9	Bangladesh [18]	×	HOMER	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	×	✓	RSD
10	India [19]	×	HOMER	✓	×	×	×	✓	×	×	×	✓	RSD
11	Tunisia [20]	×	HOMER	✓	✓	×	×	✓	✓	×	×	✓	COM
12	Saudi Arabia [21]	×	HS, PSO	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	×	✓	DOM
13	Egypt [22]	×	HOMER	✓	✓	×	×	×	✓	×	×	×	COM
14	India [23]	×	HOMER	✓	×	×	×	✓	×	×	×	✓	COM
15	China [24]	×	HOMER	×	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	IND
16	Thailand [25]	×	HOMER	✓	×	✓	×	✓	×	✓	✓	✓	IL
17	Iraq [26]	×	HOMER	✓	×	×	×	✓	×	×	✓	✓	RSD
18	Europe [27]	×	GA, PSO	✓	✓	×	×	✓	✓	×	×	✓	DOM
19	Africa [28]	×	HOMER	✓	×	✓	×	✓	×	✓	✓	✓	DOM
20	India [29]	×	HOMER	✓	×	×	×	✓	×	×	✓	✓	DOM
21	South Korea [30]	×	HOMER	✓	×	✓	×	✓	×	✓	✓	✓	COM
22	Saudi Arabia [31]	×	HOMER	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	IND
23	China [32]	×	HOMER	✓	✓	×	×	✓	✓	×	✓	✓	IL
24	India [33]	×	GA, PSO	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	×	✓	AGR
25	Pakistan [34]	×	HOMER	✓	✓	×	×	✓	✓	×	✓	✓	DOM
26	Turkey [35]	×	HOMER	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	RSD
27	Saudi Arabia [36]	×	HOMER	✓	✓	×	×	×	✓	×	✓	×	COM
28	Bangladesh [37]	×	HOMER	✓	×	✓	×	✓	×	✓	✓	✓	DOM
29	Northeast India [38]	×	HOMER	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	DOM
30	South Korea [39]	×	HOMER	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	COM
31	Southern Turkey [40]	×	HOMER	✓	×	✓	×	✓	×	✓	✓	✓	RSD
32	Saudi Arabia [41]	×	HOMER	✓	✓	×	×	✓	✓	×	✓	✓	DOM
33	Pakistan [42]	×	HOMER	✓	×	×	×	✓	×	×	✓	✓	AGR
34	India [43]	×	HOMER	✓	×	×	×	×	×	×	×	×	DOM
35	Namibia [44]	×	HOMER	✓	×	✓	×	✓	×	✓	✓	✓	RSD
36	East Malaysia [45]	×	HOMER	✓	×	×	×	✓	×	×	✓	✓	DOM
37	Colombia [46]	×	HOMER	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	DOM
38	Yamen [47]	×	HOMER	✓	✓	✓	×	×	✓	✓	✓	×	DOM
39	Malaysia [48]	×	HOMER	✓	×	✓	×	✓	×	✓	✓	✓	DOM
40	Iran [49]	×	HOMER	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	IND
41	Chile [50]	×	HOMER	×	✓	×	×	×	✓	×	✓	×	RSD
42	Saudi Arabia [51]	×	PSO	✓	✓	×	×	✓	✓	×	×	✓	DOM
43	Australia [52]	×	PSO	✓	✓	×	×	×	✓	×	×	×	DOM
44	<b>Proposed Study (Pakistan)</b>	✓	<b>HOMER</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<b>TELEC</b>

**Note:** SA – Sensitivity analysis, PV – Photo-voltaic, DG – Diesel generator, EV – Electric vehicle charging station, IRR – Internal rate of return, IL – Island load, DOM – Domestic, COM – Commercial, AGR – Agricultural, RSD – Residential, IND – Industrial; **TELEC** – Telecom base transceiver station (BTS) load, WE – Wind energy, BA – Battery, LCOE – Levelized cost of energy.

into account for an HRES design to be really sustainable. Creating a successful HRES dispatch plan also requires comparing various dispatch strategies in terms of technological, economical, ecological, and social concerns. In addition to reducing stakeholder costs associated with managing load demand, this initiative seeks to improve social standing and reduce environmental degradation. The authors were motivated to conduct additional study and write a paper on the topic by the hybrid renewable energy system’s integrated techno-economic-environmental-socio-technical design with an appropriate dispatch strategy for telecommunication demands. The techno-economic-environmental analysis of integrating renewable resources (solar, wind, biomass, and hydro) with electric vehicle charging stations and battery storage systems with base transceiver stations in Pakistan’s telecom industry forms the basis of this proposed study’s detailed review.

**OVERVIEW OF ASSESSMENT METHOD**

The details assessment method is explained below.

Step 1: Optimal sizing of HRES system:

- design components of proposed hybrid BTS system;
- simulation computer tools required to optimize renewable resources.

Step 2: Results and Discussion:

- optimization outcomes of standalone and On-Grid EV’s based hybrid BTS sites;
- optimal renewable resources and energy storage to optimized HRE Plants.

Step 3: Conclusion.

**OPTIMZAL SIZING OF HRES SYSTEM**

Some of the ideal size issues linked with HRES systems include approximating the system parameters and components with the highest capacity while also taking feasibility and reliability restrictions into consideration. It is observed that this research is predicated

on the implementation of HRES grids and only optimal generating and storage unit sizing is taken into account through the use of optimization techniques [53, 54]. In this scenario, governments often plan and build HRES networks. As a result, the distribution of grid installation on HRES systems is not sufficiently well-documented for cost analysis. Additionally, producing and storage facilities are usually located near rural regions, therefore the HRES grid is far less expensive than traditional power networks [55].

**Design components of proposed hybrid BTS system.** In this proposed study, multiple cites of BTS are taken from all over the Pakistan including north, south and central region. Therefore, the existing BTS have only diesel generator and battery bank. While the proposed BTS have renewable resources (wind, solar, biomass and hydro) with electric vehicle charging stations and battery storage system. The comparison of components of existing and proposed BTS sites are shown in Table 2. The existing and proposed BTS infrastructure is shown in Fig. 1.

The detail components of HBTS system are shown in Fig. 2. The advantages and disadvantages of renewable resources are shown in Table 3.

**Simulation computer tools required to optimize renewable resources.** The challenges confronting the energy industry are complex and interrelated. Energy modeling methods help solve problems in the energy business. Many tools with a wide variety of uses, ranges, and scopes are available. The correct tool can accomplish the intended energy aims, even though no energy tool can address every problem facing the sector. A mechanism that may combine all renewable resources in a more long-term way and have techno-economic-environmental analysis at least at the national level was required for this research project. The specific features of a number of tools are listed below in Table 4.

**Table 2.** Comparison of existing and proposed BTS system components  
**Таблица 2.** Сравнение компонентов существующей и предлагаемой системы BTS

	Diesel generator	Battery storage system	On-grid	Solar	Wind	Biomass	Hydro	EV charging station
Existing System	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Proposed System	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

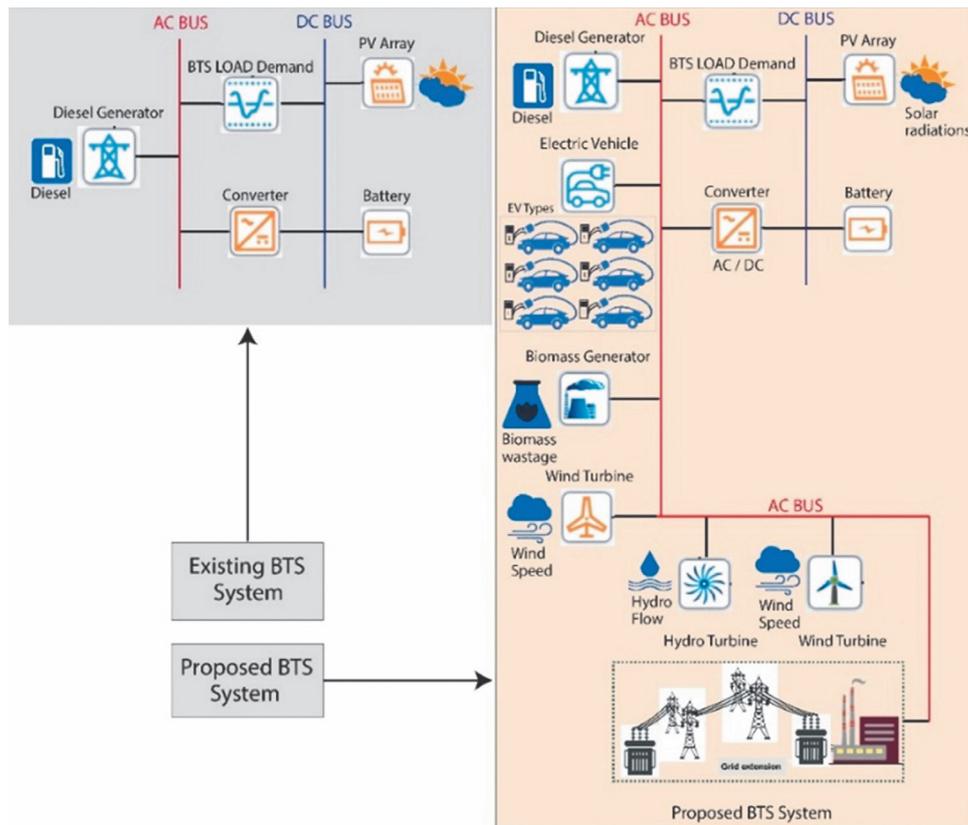


Fig. 1. Proposed BTS system infrastructure  
Рис. 1. Инфраструктура предлагаемой системы BTS

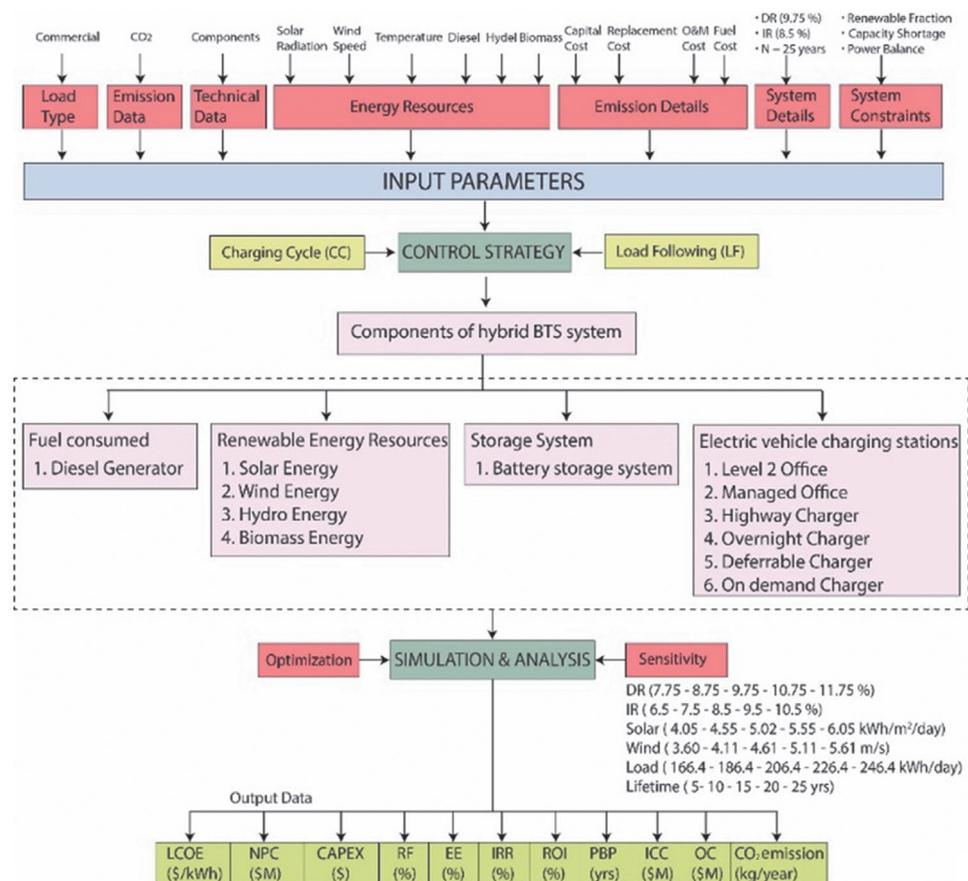


Fig. 2. Proposed HBTS system components  
Рис. 2. Компоненты предлагаемой системы HBTS

**Table 3.** Advantages and disadvantages of renewable resources

**Таблица 3.** Преимущества и недостатки возобновляемых ресурсов

Renewable energy sources	Global share	Advantages	Disadvantages	Top countries
Solar Energy [56, 57]	24.70%	<ul style="list-style-type: none"> <li>Economical</li> <li>Low maintenance</li> <li>Longer life</li> <li>Easy installation</li> <li>Technical maturity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Larger land acquisition</li> <li>Toxic material deposition</li> <li>Relative lower efficiency</li> <li>High initial costs</li> <li>Intermittent</li> <li>Susceptible to storms</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Japan</li> <li>China</li> <li>Germany</li> <li>United States</li> </ul>
Wind Energy [58, 59]	25.26%	<ul style="list-style-type: none"> <li>High efficiency</li> <li>Greater technical maturity</li> <li>Easy installation over land and water</li> <li>Lower environmental impact</li> <li>Reduce dependency on fossil fuels</li> <li>Minimal water usage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Larger land acquisition</li> <li>Intermittency and reliability issues</li> <li>High initial costs</li> <li>Noise and visual impact</li> <li>Wildlife impact</li> <li>Difficult to transport</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>United States</li> <li>China</li> <li>India</li> <li>Germany</li> </ul>
Biomass Energy [56, 57]	9–10%	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reliable and Sustainable</li> <li>Versatile Energy source</li> <li>Sustenance rural economies</li> <li>Less dependency on fossil fuels</li> <li>Compatible with existing infrastructure</li> <li>Higher efficiency</li> <li>Reduction of waste material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Carbon emissions</li> <li>Deforestation and habitat use</li> <li>Land and water resource use</li> <li>Lower energy density</li> <li>Air pollution</li> <li>High cost for large scale production</li> <li>Seasonal availability and storage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>United States</li> <li>China</li> <li>Brazil</li> <li>Germany</li> <li>India</li> <li>Sweden</li> <li>Finland</li> </ul>
Hydro Energy <sup>3</sup> [60]	44.47%	<ul style="list-style-type: none"> <li>Renewable and reliable</li> <li>Low greenhouse gas emission</li> <li>High energy efficiency</li> <li>Flexible and adjustable power</li> <li>Supports water management and irrigation</li> <li>Long lifespan</li> <li>Low operating costs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flood and erosion</li> <li>Displacement of communities</li> <li>High initial costs</li> <li>Risk of drought and water dependency</li> <li>Lon construction time</li> <li>Potential for methane emission</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>China</li> <li>Brazil</li> <li>Canada</li> <li>United States</li> <li>Russia</li> <li>India</li> <li>Norway</li> </ul>

**Table 4.** A detailed overview of simulation tools to optimize renewable resources use

**Таблица 4.** Подробный обзор инструментов моделирования, используемых для оптимизации использования возобновляемых ресурсов

Tool name	Developer	Time-step	Analysis type	Accessibility
AEOLIUS	Karlsruhe	Minutes	Simulation only	Commercial
Balmorel	Individual	Hourly	Simulation, Balancing & Optimization	Free
CREST	NREL	Hourly	Optimization only	Free
DER-CAM	Micro grid team, Berkeley lab	Hourly	Optimization & Balancing	Free
EnergyPLAN	Aalborg University, Denmark	Minutes	Simulation only	Commercial
E4cast	ABARE	Yearly	Optimization & Balancing	Commercial
ENPEP	National Laboratory, USA	Yearly	Balancing only	Free
EVST	NREL	Hourly	Simulation & Optimization	Paid
EMPS	SITEF	Weekly	Simulation & Optimization	Commercial
Gatecycle	GE	Hourly	Simulation Only	Paid
GridLAB-D	PNNL	Seconds	Simulation only	Free
HOMER	NREL	Hourly	Simulation & Optimization	Free + Paid
Helioscope	Folsom Labs	Minutes	Simulation & Balancing	Paid
INFORSE	Europe Secretariat	Yearly	Balancing & Optimization	Paid

<sup>3</sup>Electricity from renewable resources: status, prospects, and impediments // Internet Archive. Available from: <https://archive.org/details/electricityfromr0000nati/page/n7/mode/2up> [Accessed 30th September 2023].

**Продолжение табл. 4**

IKARUS	Institute of Energy Research	Yearly	Optimization only	Commercial + Free
Invert	EEG	Yearly	Simulation & Optimization	Free
Kom Mod	Fraunhofer IES	Hourly	Simulation only	Unknown
LEAP	Stockholm Institute	Monthly & Daily	Simulation & Optimization	Paid
MESSAGE	IIASA	5 years	Optimization & Balancing	Free
Mesap PlaNet	IER	Any	Simulation & Optimization	Commercial
NEMS	EIA	Weekly	Balancing only	Free
PVWatts	NREL	Hourly	Simulation only	Free
PVsyst	PVsyst SA	Minutes	Simulation only	Free
PERSEUS	Karlsruhe University	Typical days	Simulation & Balancing	Free + Paid
ProdRisk	SINTEF	Hourly	Simulation & Optimization	Commercial
RETScreen	CEDRL	Hourly	Simulation & Balancing	Free
REopt	NREL	Hourly	Simulation & Optimization	Free
ReEDS	NREL	Yearly	Simulation only	Free
SAM	NREL	Hourly	Simulation & Optimization	Free + Paid
SimREN	iSUSI	Minutes	Simulation only	Paid
WASP	IAEA	Yearly	Simulation & Optimization	Commercial + Free
Windographer	AWS true power	Hourly	Simulation & Optimization	Paid
Windpro	EMD international	Hourly	Simulation & Optimization	Paid

**RESULT & DISCUSSION**

In this section, result and discussion of proposed study is described. This section is separated into two sessions, one is “Optimization outcomes of Standalone and On-Grid EV’s Based Hybrid BTS Sites” and second is “Optimal renewable resources and energy storage to optimized HRE Plants”.

**Optimization outcomes of Standalone and On-Grid EV-based Hybrid BTS Sites.** It can be seen that, in this planned study, the 42 BTS sites from all over Pakistan is selected. It is evident that all objective functions (LCOE, ICC, NPC, and OC) and financial pa-

rameters (IRR, ROI, and PBP) are fulfilled following the combination of renewable resources (solar, biomass, hydro, and wind energy) with battery bank. The optimized output of standalone hybrid BTS sites are shown in Table 5.

The objective and financial parameters achieved by On-Grid EV’s based hybrid BTS sites are revealed in Table 6. It can be seen that after integrating different types of electric vehicle charging stations and renewable resources (wind and solar) with battery storage system and grid, all objective and financial parameters are achieved.

**Table 5.** Optimized output parameters of standalone hybrid BTS sites

**Таблица 5.** Оптимизированные выходные параметры автономных гибридных BTS площадок

BTS site names	Objective parameters				Financial parameters			Renewable resources and storage system					On-grid and EV charging stations	
	LCOE	ICC	OPC	NPC	IRR	ROI	PBP	PV	Wind	Biomass	Hydro	Battery	On-Grid	EV's
Chakwal	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	x	✓	x	x
Islamabad	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	✓	x	x
Jhelum	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	✓	x	x
Rawalpindi	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	✓	x	x
Talagang	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	x	✓	x	x
Taxila	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	✓	x	x
Bajaur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	✓	x	x
Dir	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	x	x
Mardan	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	x	x
Chitral	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	x	x
Swat	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	x	x

Продолжение табл. 5

Kohat	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	X
Nowshera	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	X
Buner	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	X	X
Peshawar	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	X
Abbottabad	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	X
Kohistan	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	X	X
Mansehra	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	X	X
Gilgit	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	X
Mingora	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	X
Malakand	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	X	X
Kamri	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	X	X
Mirpur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	X	X	✓	X	X
Muzaffarabad	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	X	X	✓	X	X
Lahore	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	X
Sheikhupura	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	X	✓	X	X
Bhakkar	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	X	✓	X	X
Khushab	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	X
Mianwali	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	X
DG Khan	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	X	✓	X	X
Layyah	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	X	✓	X	X
Karachi-I	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	X	X
Karachi-II	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	X	X
Badin	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	X	X
Hyderabad	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	X	X
Mirpur Khas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	X
Ghotki	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	X
Rajan Pur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	X	X
RahimYar Khan	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	X
Sukkur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	X
Gawadar	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	X
Quetta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	X

Table 6. Objective and financial parameters of On-grid EV-based hybrid BTS sites

Таблица 6. Объективные и финансовые параметры гибридных BTS площадок на базе On-grid EV

BTS site names	Objective parameters				Financial parameters			On-grid and EV charging stations					
	LCOE	ICC	OPC	NPC	IRR	ROI	PBP	PV	Wind	Battery	On-Grid	EV's	
Islamabad	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
Jhelum	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
Bajaur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
Kohat	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
Peshawar	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
Abbottabad	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
Mingora	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
Muzaffarabad	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
Lahore	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
Mianwali	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
Karachi-I	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Badin	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hyderabad	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Rajan Pur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
Quetta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓

**Optimal renewable resources and energy storage to optimized HRE Plants.** In addition to computer software, authors have produced a number of novel models to address situations in which computer tools are not relevant. These models include a variety of commonly reviewed algorithms, such as GA, MCA, PSO, FL, or a combination of these approaches. Table 7 provides a summary of all the research based on these mathematical techniques. The advantages of these cutting-edge techniques are not thoroughly discussed in this article because it concentrated more on the computer tools method.

In conclusion, different techno-economic [64] assessment methods are needed for HRES at the national, regional, and building scales since analytical criteria and concerns vary from scale to scale. Therefore, this paper suggests a framework for the HRES techno-economic analysis shown in Fig. 3, based on scale characteristics and research emphases. The following is an explanation of some promising approaches along with the associated inputs and outputs. The analysis takes a more macroscopic approach when examining systems at the national or international level. For example, it focuses more on whether the associated emissions and technology can meet the needs of national development, but

it aims for less cost-effective outcomes. Because money is not a major issue for a nation when compared to a local location. Rather, socioeconomic viability is gathered as a crucial metric. Therefore, it is important to consider conditions such as LCOE, import/export policies, carbon taxes, and incentive programs beforehand. Furthermore, the most important technological restricting elements to be taken into account are the availability of resources (such as acquisition difficulty) and the possibility for RE use.

In this paradigm, regional systems are separated into two groups: those in state, federal, government property, cities, and industry, and those in remote, domestic, or island locations. The former is incorporated into the framework at the national level because they still have substantial territories. However, as they are all part of stand-alone systems, the latter always employ techniques and technologies similar to those used by building systems. A few factors should receive extra attention since techno-economic analysis for HRES in buildings requires solid and comprehensive system designing, in contrast to systems. First, it is crucial to research the weather because the available renewable resources are always changing. The installation specifications of certain components,

**Table 7.** A detailed description of technical and economic studies with developed models/algorithms

**Таблица 7.** Подробное описание технико-экономических исследований с разработанными моделями/алгоритмами

Location	Selected renewable sources	Proposed approach	Selected algorithms	Objective functions	Ref.
Germany	Solar & Hydro	REMoD-D	Mathematical numeric optimizer	Annual cost	[61]
Ontario	Solar, Wind, Hydro, Hydrogen & Biomass	Silver model	Linear optimization	Total generated cost	[62]
Japan	Solar & Wind	Top-down	-	-	[63]
Agricultural	Solar & Biogas	Homan method [65]	Net present value method	NPV	[65]
Public building	Solar	-	MATLAB Algorithm	Life cycle cost	[66]
City	Solar & Wind	Computer program	-	Total cost	[67]
India	Solar, Wind, Hydro, Biomass and Hydrogen	Multi-node	-	Total cost	[68]
Residential	Solar, Wind & Hydrogen	Optimization model	GA & PSO	Total cost	[69]
New Zealand	Geothermal, Wind, Hydro & Biomass	Analytical approach	-	Energy Spillage	[70]
City	Solar & Battery	-	Differential evolution	LCOE & LCC	[71]
Commercial	Solar, Wind & Battery	-	Firefly inspired	COE	[72]
Industrial	Solar, Wind & Battery	-	Multi-objective grey wolf	COE	[73]
Australia	Solar, Wind, Hydro, Biomass & Geothermal	Computer program	-	Energy consumption	[74]

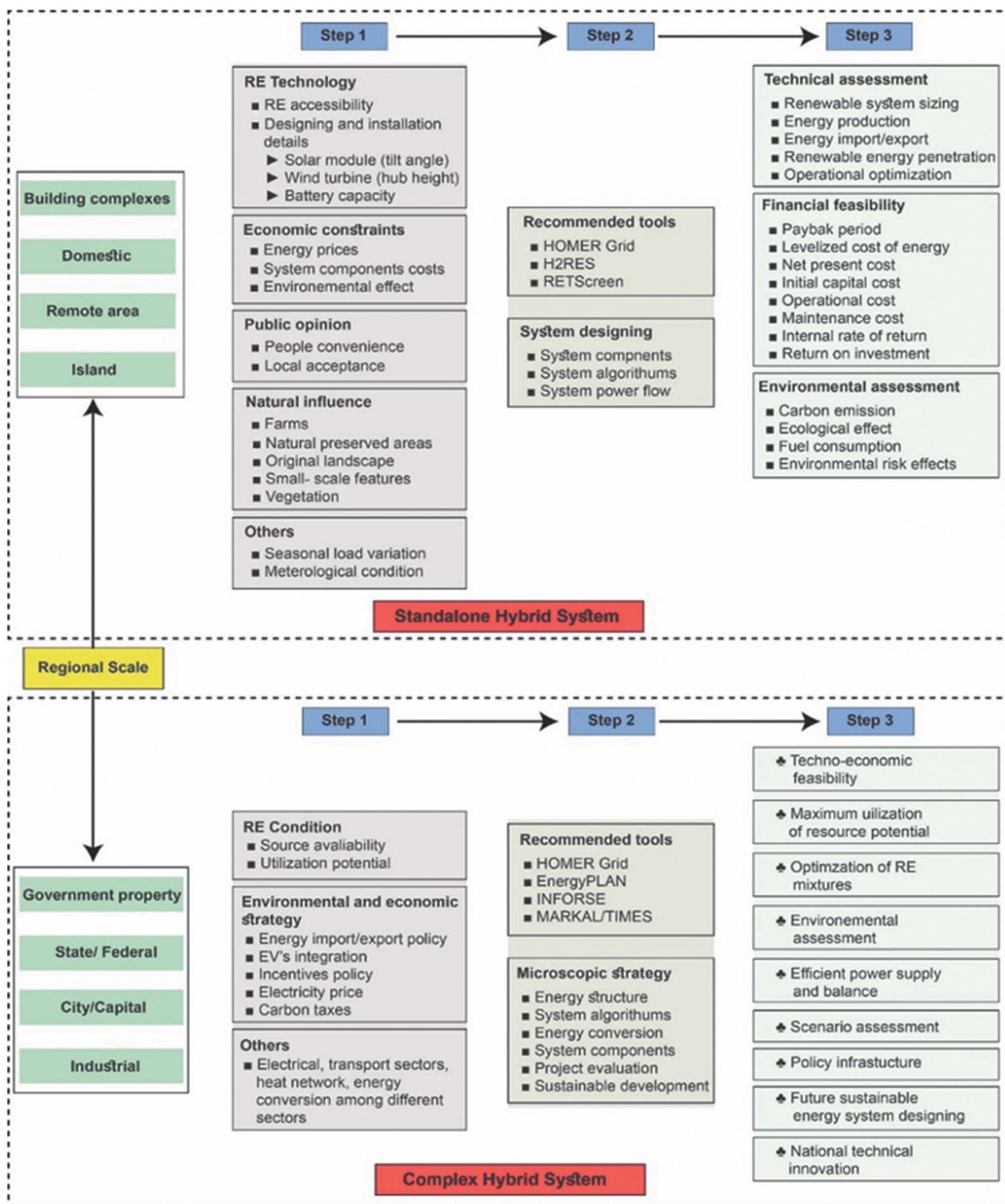


Fig. 3. Proposed framework for a standalone system and a complex hybrid system  
 Рис. 3. Предлагаемая структура для автономной и сложной гибридной систем

such as the number and slope angle of PV, the number and hub height of WT, the options for battery capacity, etc., are also crucial considerations.

Second, the primary financial limitations are the costs of system equipment and local

energy prices. Thirdly, natural influence should be taken into account when installing RE projects. This means that original structures such as farms, plants, landscapes, natural conserved areas, or small-scale elements (for islands) shouldn't be destroyed.

Furthermore, the foundation of RE projects is local support and public acceptance. Another important consideration is the target people's comfort and convenience, as designed systems are meant to serve them. In particular, while creating systems for resorts, the original landscape and tourism development should not be compromised. Not to be overlooked is the seasonal load change brought on by the tourist peak. One can choose the points that meet the specific analysis and determine the aforementioned spatial scale requirements before beginning to examine a system. The most suggested tools, HOMER, RETScreen, and H2RES, can then be used to acquire detailed output results that include economic, technical, and environmental performance. Generally speaking, this architecture consists of three processes for systems, whether they are large-scale or standalone. First, the key characteristics and needs of a certain system type and spatial scale are noted. The best models or tools are then recommended. The techno-economic evaluation may finally be carried out in its entirety thanks to the encouraging simulation findings and outputs that were offered in the framework's last step. The suggested tools can effectively support HRES on their respective scales within this framework [75].

Through scenario analysis, energy balance, system configuration optimization, relevant indicator calculation, etc., they are utilized to solve techno-economic assessment problems in an efficient manner. Numerous applications mentioned in this study and on these six tools' official website demonstrated their exceptional capacity to direct practices. Therefore, the suggested framework is successfully validated using the aforementioned workable tools in addition to the real inputs taking into account the numerous limiting considerations mentioned at the outset. In addition to helping system designers understand potential carelessness and other factors that should be taken into account when developing diverse energy systems, it can offer a very efficient means of doing future research in the field of HRES techno-economic analysis at various spatial levels.

## CONCLUSION

Growing demand for power Providing consistent electricity to connected loads is be-

coming more challenging due to the sporadic nature of individual renewable resources. The intermittent nature of HRES may be addressed by an efficacious and enduring energy storage system, which lowers maintenance costs and, consequently, the overall operating expenses of the system. However, when paired with storage bank system, hybridization can help mitigate the sporadic nature of HRES. Flywheels, compressed air energy storage, hydrogen fuel cells, super capacitors, super conducting magnetic energy storage, pumped hydro energy storage, and battery storage systems are some of the energy storage options offered by HRES. Compared to a battery and other storage systems, the integrated system delivers improved round-trip efficiency, increased reliability of the power supply, reduced revenue losses, cost savings, a low investment cost, maximum accessible energy, a longer lifespan, and less greenhouse gas emissions. According to earlier research, two of the most useful HRES storage options are freshwater resources.

The following ideas have been put up to conquer the previously described confrontation to the ideal sizing of HRES acceptance with ESS combination:

- The present state of HRES technology, when combined with ESS, may cover several problems with the earlier technology, such as capacity, competence, and dependability. The extent to which this innovation will be further developed for upcoming usage in MG technology has been selected. Energy sizing, cost, safety, and efficacious management are becoming the attention of study.

- For the components of the HRES and ESS systems to scale adequately, intelligent procedures (meta-heuristic approaches) must be collectively used with the right control settings, or more efficacious methods must be established. It might be argued that the hybrid GWOPSO optimization approaches are the finest at accomplishing the objective of an ESS in combination with a reliable, cost-effective, and ecologically friendly HRES.

- HRES needs an ESS that associates the features of a high-power and energy storage system in order to decrease power quality problems and improve system stability and reliability. High-energy ESS devices react more slowly and have a longer lifespan, whereas high-pow-

er devices assistance temporarily from rapid reactions at high rates. Combining both of these ESS types could result in improved power quality with connected loads.

According to many study results, FITs for loads in grid-connected HRES must be achieved by supplying excess energy to the grid. Consequently, a greater proportion of HRES currently use renewable sources. In order to lower power costs and generate revenue for the municipal, the FIT enables users to sell their excess energy to the grid. To optimize component size based on emission, reliability, and economic functions, new software tools and meta-heuristic optimization methodologies are required. Meta-heuristic optimization methods work better for scaling HRES. However, current software tools, including the HOMER software, are incompetent to address multi-objective problems. It is also difficult to deploy demand-side management response systems using this software. After that, software may be used, allowing designers to more freely size HRES systems.

The summary of prospective research projects of techno-economic evaluation in HRES

for all spatial scales based on the gaps and current research progress is explained below:

- Setting a maximum limit for the share of possible RE is crucial to preventing excess energy output during the integration of RE sources into a system. Currently, there are a few indicators that quantify this limit, but the most of them were created for EnergyPLAN software assessments. One goal to be accomplished in the future is to define more types of measurement indexes that apply to various tools.

- At the moment, self-built analysis models and programs are highly independent but insufficiently flexible. Usually, authors who are in their own region at comparable spatial scales invent them first, then use them. To build on their advantages and increase their adaptability, these various models and programs can be integrated and used in various case studies in subsequent projects.

- Develop a set of comprehensive assessment metrics suitable for HRES at all sizes, from building to global. Create an integrated techno-economic evaluation system or HRES model for all scales to improve assessment's efficiency and convenience.

## References

1. Abdulmula A.M.O., Sopian K.B., Kazlizan A., Lim Chin Haw. Performance evaluation of standalone double axis solar tracking system with maximum light detection MLD for telecommunication towers in Malaysia. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2019;10(1):444-453. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v10n1.pp444-453>.
2. Amutha W.M., Andrew H.C., Shajie A.D., Paulraj J.P.I. Renewable power interface based rural telecom. *International Journal of Power Electronics and Drive System*. 2019.10(2):917-927. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v10.i2.pp917-927>.
3. Oviroh P.O., Jen Tien-Chien. The energy cost analysis of hybrid systems and diesel generators in powering selected base transceiver station locations in Nigeria. *Energies*. 2018;11(3):687. <https://doi.org/10.3390/en11030687>.
4. Zebra E.I.C., Windt H.J., Nhumaio G., Faaij A.P.C. A review of hybrid renewable energy systems in mini-grids for off-grid electrification in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;144:111036. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111036>.
5. Semaoui S., Arab A.H., Bacha S., Azoui B. The new strategy of energy management for a photovoltaic system without extra intended for remote-housing. *Solar energy*. 2013;94:71-85. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.029>.
6. Robitaille M., Agbossou K., Doumbia M.L. Modeling of an islanding protection method for a hybrid renewable distributed generator. In: *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. 2005. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2005.1557259>.
7. Sahoo U., Kumar R., Singh S.K., Tripathi A.K. Energy, exergy, economic analysis and optimization of polygeneration hybrid solar-biomass system. *Applied Thermal Engineering*. 2018;145:685-692. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.093>.
8. Koohi-Kamali S., Rahim N.A. Coordinated control of smart microgrid during and after islanding operation to prevent under frequency load shedding using energy storage system. *Energy conversion and management*. 2016;127:623-646. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.052>.
9. Raveendhra D., Poojitha R., Narasimharaju B.L., Domyshev A., Dreglea A., Dao Minh Hien, et al. Part II: State-of-the-art technologies of solar-powered DC microgrid with hybrid energy storage systems: converter topologies. *Energies*. 2023;16(17):6194. <https://doi.org/10.3390/en16176194>.
10. Shezan S.A., Ishraque M.F., Muyeen S.M., Arifuzzaman S.M., Paul L.C., Das S.K., et al. Effective dispatch strategies assortment according to the effect of the operation for an islanded hybrid microgrid. *Energy Conversion and Management: X*. 2022;14:100192. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100192>.

11. Kuetche C.F.M., Tsuanyo D., Fopah-Lele A. Analysis of hybrid energy systems for telecommunications equipment: a case study in Buea Cameroon. In: *Renewable Energy and digital technologies for the development of Africa: E3S Web of Conferences*. 2022;354:02007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235402007>.
12. Naderipour A., Ramtin A.R., Abdullah A., Marzbali M.H., Nowdeh S.A., Kamyab H. Hybrid energy system optimization with battery storage for remote area application considering loss of energy probability and economic analysis. *Energy*. 2022;239(D):122303. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122303>.
13. Kushwaha P.K., Bhattacharjee C. Integrated techno-economic-enviro-socio design of the hybrid renewable energy system with suitable dispatch strategy for domestic and telecommunication load across India. *Journal of Energy Storage*. 2022;55(A):105340. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105340>.
14. Okundamiya M.S., Wara S.T., Obakhena H.I. Optimization and techno-economic analysis of a mixed power system for sustainable operation of cellular sites in 5G era. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(39):17351-17366. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.207>.
15. Memon S.A., Upadhyay D.S., Patel R.N. Optimal configuration of solar and wind-based hybrid renewable energy system with and without energy storage including environmental and social criteria: a case study. *Journal of Energy Storage*. 2021;44:103446. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103446>.
16. Khan F.A., Pal N., Saeed S.H. Optimization and sizing of SPV/wind hybrid renewable energy system: a techno-economic and social perspective. *Energy*. 2021;233:121114. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121114>.
17. Ali F., Ahmar M., Jiang Yuexiang, AlAhmad M. A techno-economic assessment of hybrid energy systems in rural Pakistan. *Energy*. 2021;215(A):119103. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119103>.
18. Das B.K., Alotaibi M.A., Das P., Islam M.S., Das S.K., Hossain M.A. Feasibility and techno-economic analysis of stand-alone and grid-connected PV/wind/diesel/batt hybrid energy system: a case study. *Energy Strategy Reviews*. 2021;37:100673. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100673>.
19. Kumar A., Verma A. Optimal techno-economic sizing of a solar-biomass-battery hybrid system for off-setting dependency on diesel generators for microgrid facilities. *Journal of Energy Storage*. 2021;36:102251. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102251>.
20. Amara S., Toumi S., Salah C.B., Saidi A.S. Improvement of techno-economic optimal sizing of a hybrid off-grid micro-grid system. *Energy*. 2021;233:121166. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121166>.
21. Alshammari N., Asumadu J. Optimum unit sizing of hybrid renewable energy system utilizing harmony search, Jaya and particle swarm optimization algorithms. *Sustainable Cities and Society*. 2020;60:102255. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102255>.
22. Diab A.A.Z., Sultan H.M., Kuznetsov O.N. Optimal sizing of hybrid solar/wind/hydroelectric pumped storage energy system in Egypt based on different meta-heuristic techniques. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27(26):32318-32340. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06566-0>.
23. Ramesh M., Saini R.P. Dispatch strategies based performance analysis of a hybrid renewable energy system for a remote rural area in India. *Journal of Cleaner Production*. 2020;259:120697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120697>.
24. Li Chong, Zhou Dequn, Wang Hui, Lu Yuzheng, Li Dongdong. Techno-economic performance study of stand-alone wind/diesel/battery hybrid system with different battery technologies in the cold region of China. *Energy*. 2020;192:116702. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116702>.
25. Veilleux G., Potisat T., Pezim D., Ribback C. Techno-economic analysis of microgrid projects for rural electrification: a systematic approach to the redesign of Koh Jik off-grid case study. *Energy for Sustainable Development*. 2020;54:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.09.007>.
26. Aziz A.S., Tajuddin M.F.N., Adzman M.R., Mohammed M.F., Ramli M.A.M. Feasibility analysis of grid-connected and islanded operation of a solar PV microgrid system: a case study of Iraq. *Energy*. 2020;191:116591. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116591>.
27. Mayer M.J., Szilágyi A., Gróf G. Environmental and economic multi-objective optimization of a household level hybrid renewable energy system by genetic algorithm. *Applied Energy*. 2020;269:115058. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115058>.
28. Odou O.D.T., Bhandari R., Adamou R. Hybrid off-grid renewable power system for sustainable rural electrification in Benin. *Renewable Energy*. 2020;145:1266-1279. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.032>.
29. Kumar J., Suryakiran B.V., Verma A., Bhatti T.S. Analysis of techno-economic viability with demand response strategy of a grid-connected microgrid model for enhanced rural electrification in Uttar Pradesh state, India. *Energy*. 2019;178:176-185. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.105>.
30. Kim Min-Hwi, Kim Deukwon, Heo Jaehyeok, Lee Dong-Won. Techno-economic analysis of hybrid renewable energy system with solar district heating for net zero energy community. *Energy*. 2019;187:115916. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115916>.
31. Baseer M., Alqahtani A., Rehman S. Techno-economic design and evaluation of hybrid energy systems for residential communities: case study of Jubail industrial city. *Journal of Cleaner Production*. 2019;237:117806. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117806>.
32. Javed M.S., Song Aotian, Ma Tao. Techno-economic assessment of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island using genetic algorithm. *Energy*. 2019;176:704-717. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.131>.

33. Sawle Y., Gupta S.C., Bohre A.K. Socio-techno-economic design of hybrid renewable energy system using optimization techniques. *Renewable Energy*. 2018;119:459-472. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.058>.
34. Ahmad J., Imran M., Khalid A., Iqbal W., Ashraf S.R., Adnan M., et al. Techno economic analysis of a wind-photovoltaic-biomass hybrid renewable energy system for rural electrification: a case study of Kallar Kahar. *Energy*. 2018;148:208-234. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.133>.
35. Duman A.C., Güler Ö. Techno-economic analysis of off-grid PV/wind/fuel cell hybrid system combinations with a comparison of regularly and seasonally occupied households. *Sustainable Cities and Society*. 2018;42:107-126. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.029>.
36. Alharthi, Ya.Z., Siddiki M.K., Chaudhry G.M. Resource assessment and techno-economic analysis of a grid-connected solar PV-wind hybrid system for different locations in Saudi Arabia. *Sustainability*. 2018;10(10):3690. <https://doi.org/10.3390/su10103690>.
37. Das B.K., Zaman F. Performance analysis of a PV/Diesel hybrid system for a remote area in Bangladesh: Effects of dispatch strategies, batteries, and generator selection. *Energy*. 2019;169:263-276. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.014>.
38. Kumar A., Singh A.R., Deng Yan, He Xiangning, Kumar Praveen, Bansal R.C. A novel methodological framework for the design of sustainable rural microgrid for developing nations. *Ieee Access*. 2018;6:24925-24951. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2832460>.
39. Park E. Potentiality of renewable resources: economic feasibility perspectives in South Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;79:61-70. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.043>.
40. Yilmaz S., Dincer F. Optimal design of hybrid PV-diesel-battery systems for isolated lands: a case study for Kilis, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;77:344-352. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.037>.
41. Al-Sharafi A., Sahin A.Z., Ayar T., Yilbas B.S. Techno-economic analysis and optimization of solar and wind energy systems for power generation and hydrogen production in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;69:33-49. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.157>.
42. Shahzad M.K., Zahid A., Rashid T.U., Rehan M.A., Ali M., Ahmad M. Techno-economic feasibility analysis of a solar-biomass off grid system for the electrification of remote rural areas in Pakistan using HOMER software. *Renewable Energy*. 2017;106:264-273. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.033>.
43. Jaiswal A. Lithium-ion battery based renewable energy solution for off-grid electricity: a techno-economic analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;72:922-934. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.049>.
44. Azimoh C.L., Klintenberg P., Mbohwa C., Wallin F. Replicability and scalability of mini-grid solution to rural electrification programs in sub-Saharan Africa. *Renewable Energy*. 2017;106:222-231. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.017>.
45. Das H.S., Tan Chee Wei, Yatim A.H.M., Lau Kwan Yiew. Feasibility analysis of hybrid photovoltaic/battery/fuel cell energy system for an indigenous residence in East Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;76:1332-1347. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.174>.
46. Vides-Prado A., Camargo E.O., Vides-Prado C., Orozco I.H., Chenlo F., Candelo J.E. Techno-economic feasibility analysis of photovoltaic systems in remote areas for indigenous communities in the Colombian Guajira. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;82(3):4245-4255. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.101>.
47. Ajalan A., Tan Chee Wei, Abdilahi A.M. Assessment of environmental and economic perspectives for renewable-based hybrid power system in Yemen. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;75:559-570. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.024>.
48. Halabi L.M., Mekhilef S., Olitomiwa L. Performance analysis of hybrid PV/diesel/battery system using HOMER: a case study Sabah, Malaysia. *Energy conversion and management*. 2017;144:322-339. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.070>.
49. Qolipour M., Mostafaeipour A., Tousi O.M. Techno-economic feasibility of a photovoltaic-wind power plant construction for electric and hydrogen production: a case study. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2017;78(C):113-123. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.088>.
50. Becerra M., Morán J., Cepeda F., Valenzuela M. Wind energy potential in Chile: assessment of a small scale wind farm for residential clients. *Energy Conversion and Management*. 2017;140:71-90. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.062>.
51. Eltamaly A.M., Mohamed M.A., Al-Saud M.S., Alolah A.I. Load management as a smart grid concept for sizing and designing of hybrid renewable energy systems. *Engineering Optimization*. 2017;49(10):1813-1828. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1261246>.
52. Mohamed M.A., Eltamaly A.M., Alolah A.I. Swarm intelligence-based optimization of grid-dependent hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;77:515-524. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.048>.
53. Ansari M.S., Jalil M.F., Bansal R. A review of optimization techniques for hybrid renewable energy systems. *International Journal of Modelling and Simulation*. 2023;43(5):722-735. <https://doi.org/10.1080/02286203.2022.2119524>.
54. Bansal A.K. Sizing and forecasting techniques in photovoltaic-wind based hybrid renewable energy system: a review. *Journal of Cleaner Production*. 2022;369:133376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133376>.
55. Kumar P., Pal N., Sharma H. Optimization and techno-economic analysis of a solar photo-voltaic/biomass/diesel/battery hybrid off-grid power generation system for rural remote electrification in eastern India. *Energy*. 2022;247:123560. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123560>.

56. Healy M.L., Dahlben L.J., Isaacs J.A. Environmental assessment of single-walled carbon nanotube processes. *Journal of Industrial Ecology*. 2008;12(3):376-393. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00058.x>.
57. Tsoutsos T., Frantzeskaki N., Gekas V. Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy policy*. 2005;33(3):289-296. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00241-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00241-6).
58. Nazir M.S., Mahdi A.J., Bilal M., Sohail H.M., Ali N., Iqbal H.M.N. Environmental impact and pollution-related challenges of renewable wind energy paradigm – a review. *Science of the Total Environment*. 2019;683:436-444. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.274>.
59. Nazir M.S., Ali N., Bilal M., Iqbal H. Potential environmental impacts of wind energy development: a global perspective. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2020;13:85-90. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.01.002>.
60. Fearnside P.M. Environmental and social impacts of hydroelectric dams in Brazilian Amazonia: Implications for the aluminum industry. *World development*. 2016;77:48-65. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.08.015>.
61. Henning H.-M., Palzer A. A comprehensive model for the German electricity and heat sector in a future energy system with a dominant contribution from renewable energy technologies – Part I: Methodology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;30:1003-1018. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.09.012>.
62. McPherson M., Karney B. A scenario based approach to designing electricity grids with high variable renewable energy penetrations in Ontario, Canada: Development and application of the SILVER model. *Energy*. 2017;138:185-196. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.027>.
63. Esteban M., Portugal-Pereira J. Post-disaster resilience of a 100% renewable energy system in Japan. *Energy*. 2014;68:756-764. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.045>.
64. Esen H., Inalli M., Esen M. A techno-economic comparison of ground-coupled and air-coupled heat pump system for space cooling. *Building and environment*. 2007;42(5):1955-1965. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.04.007>.
65. Esen M., Yuksel T. Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse. *Energy and Buildings*. 2013;65:340-351. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.018>.
66. Ajan C.W., Ahmed S.S., Ahmad H.B., Taha F., Zin A.A.B.M. On the policy of photovoltaic and diesel generation mix for an off-grid site: East Malaysian perspectives. *Solar Energy*. 2003;74(6):453-467. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00228-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00228-7).
67. Hosseinalizadeh R., Shakouri G.H., Amalnick M.S., Taghipour P. Economic sizing of a hybrid (PV-WT-FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by an optimization-simulation model: case study of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;54:139-150. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.046>.
68. Gulagi A., Choudhary P., Bogdanov D., Breyer C. Electricity system based on 100% renewable energy for India and SAARC. *PLoS One*. 2017;12(7):e0180611. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180611>.
69. Maleki A., Hafeznia H., Rosen M.A., Pourfayaz F. Optimization of a grid-connected hybrid solar-wind-hydrogen CHP system for residential applications by efficient metaheuristic approaches. *Applied Thermal Engineering*. 2017;123:1263-1277. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.100>.
70. Mason I.G., Page S.C., Williamson A.G. A 100% renewable electricity generation system for New Zealand utilising hydro, wind, geothermal and biomass resources. *Energy policy*. 2010;38(8):3973-3984. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.022>.
71. Ridha H.M., Gomes C., Hazim H., Ahmadipour M. Sizing and implementing off-grid stand-alone photovoltaic/battery systems based on multi-objective optimization and techno-economic (MADE) analysis. *Energy*. 2020;207:118163. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118163>.
72. Kaabeche A., Diaf S., Ibtouen R. Firefly-inspired algorithm for optimal sizing of renewable hybrid system considering reliability criteria. *Solar Energy*. 2017;155:727-738. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.070>.
73. Guezgouz M., Jurasz J., Bekkouche B., Ma Tao, Javed M.S., Kies A. Optimal hybrid pumped hydro-battery storage scheme for off-grid renewable energy systems. *Energy Conversion and Management*. 2019;199:112046. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112046>.
74. Elliston B., Diesendorf M., MacGill I. Simulations of scenarios with 100% renewable electricity in the Australian National electricity market. *Energy Policy*. 2012;45:606-613. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.011>.
75. Østergaard P.A. Reviewing EnergyPLAN simulations and performance indicator applications in EnergyPLAN simulations. *Applied Energy*. 2015;154:921-933. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.086>.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Muhammad Bilal Ali,

Cand. Sci. (Med.), PhD scholar  
in Electrical Engineering (Power) Scholar,  
U.S.-Pakistan Center for Advanced Studies in Energy,  
National University of Sciences and Technology,  
Islamabad 44000, Pakistan  
✉ muhammadbilalali082@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0001-8797-8519>

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### Билал Али Мухаммед,

к.м.н.,  
научный сотрудник Американо-Пакистанского  
центра перспективных исследований  
в области энергетики,  
Национальный университет наук и технологий,  
44000, г. Исламабад, Пакистан  
✉ muhammadbilalali082@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0001-8797-8519>

**Syed Ali Abbas Kazmi,**

Associate Professor,  
U.S.-Pakistan Center for Advanced Studies in Energy,  
National University of Sciences and Technology,  
Islamabad 44000, Pakistan  
saakazmi@uspcase.nust.edu.pk

**Аббас Казми Сайед Али,**

доцент Американо-Пакистанского  
центра перспективных исследований  
в области энергетики,  
Национальный университет наук и технологий,  
44000, г. Исламабад, Пакистан  
saakazmi@uspcase.nust.edu.pk

**Authors' contribution**

Muhammad Bilal Ali performed the research, developed research methodology, provided software support, validation, conceptualization, visualization. He also wrote an original copy of the article, edited and formatted it. Syed Ali Abbas Kazmi collected data, performed formal analysis, dealt with resources, review, editing and supervision of the article.

**Заявленный вклад авторов**

Билал Али М.: исследование, методология, программное обеспечение, проверка, концептуализация, визуализация, роли/написание – первоначальный вариант, написание и редактирование, форматирование. Аббас Казми С.А.: сбор данных, формальный анализ, ресурсы, обзор и редактирование, надзор.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

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

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Information about the article**

The article was submitted 08.10.2024; approved after reviewing 30.10.2024; accepted for publication 20.11.2024.

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 08.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 30.10.2024 г.; принята к публикации 20.11.2024 г.

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.311.24:621.548

EDN: YEVSMD

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-550-562



## Выбор состава включённого генерирующего оборудования солнечно-дизельного комплекса

А.Г. Васьков<sup>1✉</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

**Резюме.** Цель – разработка методики выбора состава включенного генерирующего оборудования солнечно-дизельного комплекса, обеспечивающей оптимизацию его режима работы по критерию минимизации удельного расхода топлива на дизель-генераторных установках. При разработке программных средств применялся принцип решения в режиме реального времени задачи целочисленного нелинейного программирования, заключающейся в поиске минимума эксплуатационных издержек при работе комплекса. При этом учитывались ограничения на режим работы электротехнического оборудования. Для дизельной электростанции: мощность – не меньше минимально допустимой, равной 30% от номинальной мощности; распределение мощности между дизель-генераторными установками – с учетом индивидуальных расходных характеристик. Для системы накопления электрической энергии: допустимое изменение емкости – от 50 до 100%; скорость заряда/разряда ограничена величиной «1С». Для солнечной электростанции учитывалось изменение коэффициента полезного действия инвертора в зависимости от его загрузки, прогнозируемой на период 24 ч. В исследованиях использовалось натурное оборудование имитационного макета солнечно-дизельного комплекса, состоящего из двух дизель-генераторных установок 12 и 30 кВт, имитатора солнечной электростанции мощностью 6,6 кВт, системы накопления энергии, имитатора активной нагрузки мощностью до 50 кВт. Приведено описание алгоритмических основ работы автоматизированной системы управления, способствующей обеспечению энергетической эффективности эксплуатируемых солнечно-дизельных комплексов. Показано, что разработанная SCADA-система позволяет обеспечить моделирование любых режимов работы солнечно-дизельного комплекса в условиях, приближенных к реальным. Установлено, что в зависимости от условий функционирования солнечно-дизельного комплекса и параметров оборудования (количество дизель-генераторных установок и их номинальные мощности, емкость и мощность системы накопления электрической энергии, установленная мощность сетевой солнечной электростанции) повышение точности моделирования его режима работы может достигать 30%. Таким образом, полученные результаты моделирования режима работы солнечно-дизельного комплекса показывают возможность существенного уточнения оценок эксплуатационных параметров подобных энергетических объектов благодаря учету реальных энергетических характеристик дизель-генераторных установок.

**Ключевые слова:** солнечная электростанция, дизельная электростанция, солнечно-дизельный комплекс, прогнозирование, управление, оптимизация

**Благодарности.** Исследование проводилось в рамках проекта «Системы управления солнечно-дизельными комплексами» при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSWF-2022-0006.

**Для цитирования:** Васьков А.Г. Выбор состава включённого генерирующего оборудования солнечно-дизельного комплекса // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 550–562. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-550-562>. EDN: YEVSMD.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Selection of generating equipment for a solar-diesel complex

Aleksey G. Vaskov<sup>1✉</sup><sup>1</sup>National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia

**Abstract.** A methodology for selecting the composition of generating equipment included in a solar-diesel complex to optimize its operating mode by minimizing the specific fuel consumption of diesel generator units is described. Software developed according to the principle of real-time integer nonlinear programming is used to calculate the minimum operating costs during the operation of the complex. Various restrictions on the operating modes

of electrical equipment were taken into account. For a diesel power plant having a minimum capacity not less than 30% of the nominal capacity, the distribution of capacity between diesel generator units takes into account individual consumption characteristics. For an electrical energy storage system whose permissible change in capacity varies from 50 to 100%, the charge/discharge rate is limited to "1C". For the solar power plant, the change in inverter efficiency was taken into account depending on its load as predicted for a 24-hour period. The research used a model to simulate full-scale equipment of a solar-diesel complex comprising two diesel generator units of 12 and 30 kW, a solar power plant simulator having a capacity of 6.6 kW, an energy storage system, and an active load simulator with a capacity of up to 50 kW. An algorithmic description of the operational principles of an automated control system for ensuring the energy efficiency of solar-diesel complexes in operation is provided. The developed SCADA system is suitable for modeling the operating modes of a solar-diesel complex under conditions close to actual. Depending on the operating conditions of the solar-diesel complex and the equipment parameters (the number of diesel generator units and their nominal capacities, the capacity and power of the electrical energy storage system, as well as the installed capacity of the grid solar power plant), operating mode modeling accuracy can be increased by as much as 30%. Thus, the obtained results of modeling the operating mode of a solar-diesel complex demonstrate the possibility of significantly refining the estimates of the operating parameters of such energy facilities by taking into account the actual energy characteristics of diesel generator units.

**Keywords:** solar power plant, diesel power plant, solar-diesel complex, forecasting, control, optimization

**Acknowledgements.** The research was carried out within the framework of the project "Solar-diesel complex control systems" with the support of the grant from Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation no. FSWF-2022-0006.

**For citation:** Vaskov A.G. Selection of generating equipment for a solar-diesel complex. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):550-562. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-534-562>. EDN: YEVSIMG.

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день на территории Российской Федерации находится в эксплуатации несколько десятков солнечно-дизельных комплексов (СДК), проектируются и строятся новые. Большинство из них расположено в изолированных и труднодоступных территориях<sup>2</sup>. Традиционным источником энергии в таких местах являются дизельные электростанции (ДЭС), применение которых сопряжено с рядом трудностей технического (высокий износ оборудования) и экономического (высокая стоимость дизельного топлива) характера. В связи с этим в состав изолированных энергетических систем внедряются солнечные электростанции (СЭС), позволяющие заместить некоторую долю ДЭС в общем энергетическом балансе.

С точки зрения проектирования и эксплуатации «СДК различной структуры и параметров можно разделить на три категории в соответствии с уровнем выработки электроэнергии солнечной электростанцией в локальной энергосистеме:

*СДК с долей СЭС в годовой выработке электроэнергии до 20% и мощностью СЭС, не превышающей 50% от мощности локальной энергосистемы.* Для таких СДК характерны следующие особенности: ДЭС находится в работе в течение всего рабочего

цикла; отмечается относительно небольшое сокращение расхода топлива, что приводит к незначительным экологическим преимуществам и невысокой экономической эффективности; при этом в таком СДК отсутствует необходимость наличия центрального контроллера управления – управление режимом работы СДК реализуется на основе штатных возможностей контроллеров дизель-генераторных установок (ДГУ) и солнечных инверторов.

*СДК с долей СЭС в годовой выработке электроэнергии от 20 до 50% и мощностью СЭС более 50% от мощности локальной энергосистемы.* Для таких СДК характерны следующие особенности: ДЭС находится в работе в течение всего рабочего цикла; присутствует необходимость наличия простого контроллера управления и/или небольшого накопителя энергии для регулирования частоты и напряжения.

*СДК с долей СЭС в годовой выработке электроэнергии более 50...80% и мощностью СЭС порядка 100...150% от мощности локальной энергосистемы и более.* Для таких СДК характерны следующие особенности: ДЭС работает непостоянно; обязательно требуется система накопления энергии (СНЭ) для перераспределения электроэнергии, вырабатываемой СЭС; обязатель-

<sup>2</sup>Объекты генерации в изолированных и труднодоступных территориях в России. Режим доступа: [https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/analitika/генерации\\_в\\_ИТТ.pdf](https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/analitika/генерации_в_ИТТ.pdf) (дата обращения: 19.04.2024).

на централизованная система управления СДК»<sup>3</sup>.

Последняя категория СДК является наиболее «интересной» для реализации, т.к. позволяет получить наивысший экономический эффект и обеспечить относительно невысокий срок окупаемости проекта. Однако на сегодняшний день отсутствуют типовые решения в области создания необходимых для эффективной эксплуатации СДК централизованных систем управления.

### ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является разработка алгоритмических основ функционирования централизованной автоматизированной системы управления (АСУ) режимом работы СДК, осуществляющей в режиме реального времени выбор оптимального состава включенного генерирующего оборудования с учетом прогноза выработки электроэнергии на СЭС. Функциональными особенностями предлагаемой АСУ являются:

- функциональный блок краткосрочного (на сутки вперед с часовыми интервалами времени) прогнозирования солнечного излучения, который выполняется при использовании данных численного прогноза погоды;
- функциональный блок оптимизации состава, параметров и режимов функционирования солнечно-дизельного комплекса с учетом выбора наиболее энергетически эффективного состава работающих дизель-генераторных установок.

Разработанный экспериментальный аппаратно-программный комплекс должен обеспечить реализацию указанных функциональных блоков в условиях, приближенных к реальным.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования способов повышения энергетической эффективности СДК в 2022 г. Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ») создал молодежную лабораторию, сотрудниками которой являются студенты и аспиранты; лаборатория

выполняет научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую работу, целью которой является разработка программного комплекса, осуществляющего быструю и надежную оптимизацию состава, параметров и режимов функционирования гибридного энергокомплекса в близких к реальным условиях эксплуатации. «Для апробации результатов работы в НИУ «МЭИ» используется учебно-экспериментальный имитационный макет солнечно-дизельного комплекса (далее – Макет).

Макет состоит из двух дизель-генераторных установок (электроагрегаты дизельные ПСМ АД12 мощностью 12 кВт и ПСМ АД30 мощностью 30 кВт), имитатора солнечной электростанции мощностью 6,6 кВт, подключенного к сети через сетевой трехфазный инвертор SMA SUNNY TRIPOWER 12000TL и системы накопления энергии на основе 12 стационарных, необслуживаемых, герметизированных аккумуляторов емкостью 200 А·ч каждый и трех батарейных инверторов Victron Quattro 48/10000/140-100/100. Функциональная схема Макета представлена на рис. 1, а основные технические характеристики<sup>3</sup> его элементов – в табл. 1».

В связи с большим разнообразием используемого в СДК оборудования для достижения независимости верхнего уровня АСУ от нижнего принято решение о создании логической «развязки» между этими двумя уровнями. Такая «развязка» реализована в формате микросервисной архитектуры, в парадигме которой разработан набор независимо функционирующих программных блоков, обменивающихся информацией через сервер базы данных. Таким образом, для верхнего уровня АСУ исполнительные механизмы представлены стандартным и неизменным набором технических параметров, значения которых могут быть получены на нижнем уровне в совершенно независимом режиме. При разработке АСУ для любого нового объекта этот подход будет требовать лишь модернизации исходных кодов микросервисов, обеспечивающих «общение» с оборудованием нижнего уровня, в то время

<sup>3</sup>Разработка методик прогнозирования солнечного излучения и оптимизации состава, параметров и режима функционирования солнечно-дизельного комплекса. Режим доступа: <https://mpei.ru/Structure/Universe/IHRE/structure/heares/susdc/Documents/%D0%9E%D1%82%D1%87%D1%91%D1%82%20%D0%AD%D1%82%D0%B0%D0%BF%202.pdf> (дата обращения: 19.04.2024).

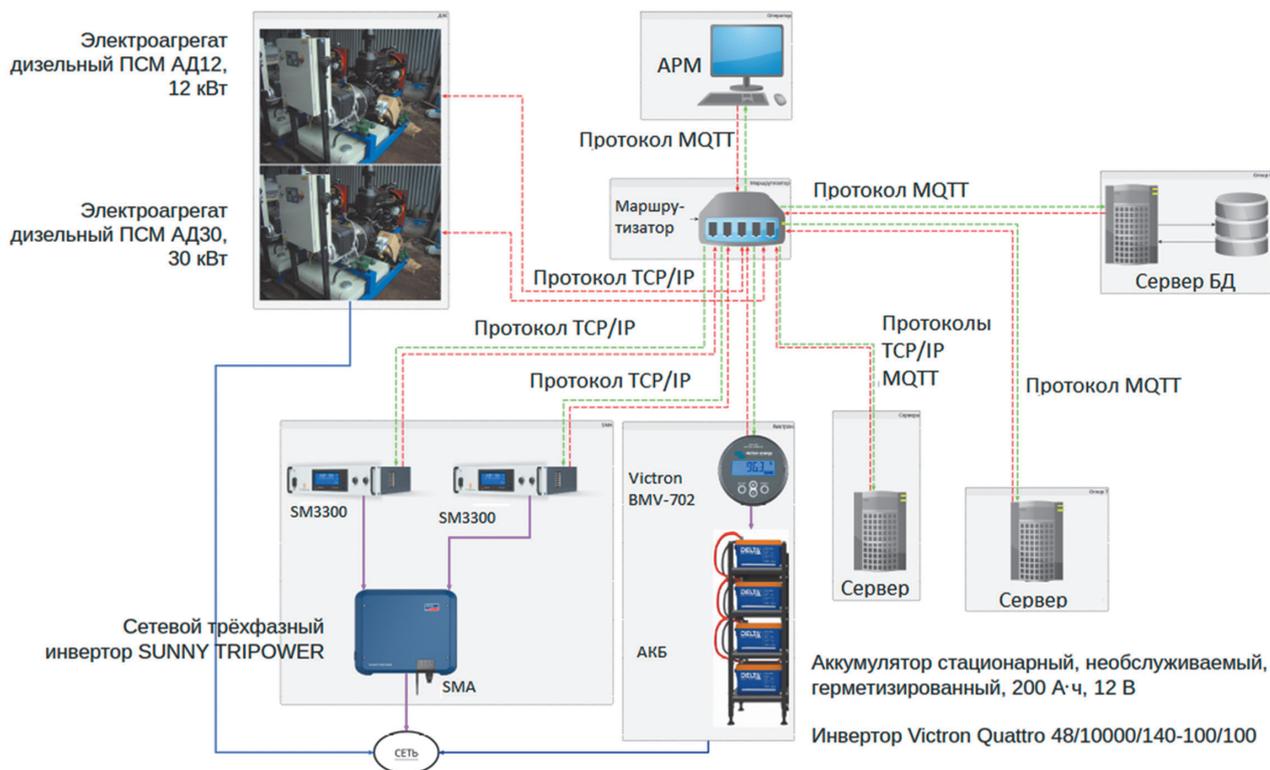


Рис. 1. Функциональная схема имитационного Макета солнечно-дизельного комплекса

Fig. 1. Flowchart of the solar-diesel complex simulation Layout

Таблица 1. Основные технические характеристики элементов Макета солнечно-дизельного комплекса

Table 1. Basic technical specifications of the solar-diesel complex Layout elements

Элемент СДК	Технические характеристики
ДГУ № 1	Номинальная мощность 12 кВт Минимально допустимая мощность 3,6 кВт (30%)
ДГУ № 2	Номинальная мощность 30 кВт Минимально допустимая мощность 9,0 кВт (30%)
Солнечный инвертор	Номинальная мощность 12 кВт
Батарейный инвертор	Номинальная мощность 30 кВт
Аккумуляторная батарея	Номинальная емкость 19,2 кВтч Минимально допустимый уровень заряда 50%

как система принятия решений останется универсальной.

Для проведения экспериментальных исследований была разработана SCADA-система, предназначенная для управления Макетом. С использованием функционала данной разработанной системы перед проведением эксперимента задаются почасовые графики потребления энергии, величины прихода солнечного излучения (СИ) и температуры поверхности фотоэлектрического модуля в течение суток. Далее, с заранее установленным периодом времени эти наборы значений передаются на управляемое оборудование: нагрузочный модуль и имитатор солнечной электростанции. Таким образом,

обеспечивается моделирование суточного изменения нагрузки и выработки электроэнергии солнечной электростанцией. Также функционал SCADA-системы позволяет производить пуск и остановку ДГУ, осуществлять мониторинг их состояния и остальных элементов Макета.

Особенности управления режимом работы Макета солнечно-дизельного комплекса, реализованные с помощью SCADA, описаны ниже.

### ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Основной алгоритмической идеей системы управления работой любой энергосистемы

является обеспечение качества энергии: поддержание частоты и величины напряжения на номинальном уровне [1, 2]. Но в случае изолированных энергетических систем, в которых очень сильно взаимное влияние источников энергии друг на друга и на потребителей (и наоборот), работа по ведению режима в формате реакции на уже произошедшие отклонения не позволяет обеспечить принятия оптимальных решений по выбору состава включенного генерирующего оборудования. Иными словами, обеспечивается качественное энерго-снабжение, но не достигается максимального экономического эффекта.

Изменить этот подход возможно лишь добавлением в алгоритм работы системы управления СДК функционального модуля, обеспечивающего предварительное выполнение прогноза режима работы СДК на некоторый период времени вперед (как правило – на сутки вперед). Такой подход позволяет заблаговременно подготовить энергетическое оборудование к изменению мощности, включению или отключению.

Вторая функциональная особенность разработанной АСУ заключается в следующем. При распределении мощности между ДГУ чаще всего используется равномерное распределение, когда каждая из установок работает с такой же удельной загрузкой, что и остальные [3]. Теоретически неоднократно показано, что это решение дает оптимум с точки зрения минимизации расхода топлива только при одинаковых энергетических характеристиках ДГУ. Как показали исследования, проведенные на Макете, это не соответствует действительности, а значит, в алгоритме управления СДК необходима реализация процедуры поиска оптимальной загрузки ДГУ.

Ниже дано краткое описание используемых решений.

В основе процесса управления лежит известное требование о выполнении баланса мощности, выраженное следующим уравнением [4]:

$$P_{\text{нагр}}(t) = N_{\text{ДЭС}}(t) + N_{\text{СЭС}}(t) \pm N_{\text{СНЭ}}(t), \quad (1)$$

где  $P_{\text{нагр}}(t)$  – совокупная мощность электроприемников (нагрузка), кВт;  $N_{\text{СЭС}}(t)$  – мощность солнечной электростанции, определяется исходя из интенсивности солнечного излучения, кВт;  $\pm N_{\text{СНЭ}}(t)$  – мощность заряда/разряда СНЭ, кВт, определяется исходя из соотношения мощности СЭС и нагрузки, а также с учетом уровня заряда аккумуляторных батарей (АКБ);  $N_{\text{ДЭС}}(t)$  – мощность ДЭС, резервная мощность, кВт.

Важные особенности решения уравнения баланса мощности, учитываемые при управлении СДК, заключаются в следующем:

1. Считается, что значение потребляемой мощности  $P_{\text{нагр}}(t)$  известно заранее из прогноза нагрузки.

2. Мощность СЭС  $N_{\text{СЭС}}(t)$  определяется также заранее из имеющегося прогноза прихода солнечного излучения в соответствии с методиками, изложенными в [5–8].

3. Мощность заряда/разряда СНЭ  $\pm N_{\text{СНЭ}}(t)$  определяется исходя из соотношения мощности СЭС и нагрузки, а также с учетом текущего уровня заряда АКБ  $SOC(t)$  [9, 10].

4. Мощность ДЭС  $N_{\text{ДЭС}}(t)$  как резервного источника энергии определяется в последнюю очередь и распределяется между используемыми ДГУ по критерию минимизации расхода топлива<sup>4,5</sup> [11–13].

Одним из основных элементов предлагаемой АСУ является модель прогнозирования режима работы СДК. Задача прогнозирования решается на ближайшие сутки с часовыми интервалами времени  $\Delta t = 1$  ч.

Для решения этой регрессионной задачи, в которой предиктант – среднечасовая плотность потока солнечного излучения, а предикторы – различные геометрические и метеорологические параметры, так или иначе коррелирующие с прогнозируемой величиной, использована нейросетевая модель с архитектурой многослойного перцептрона. Обучающая выборка состоит из совмещенных данных наземных измерений интенсивности солнечной радиации и архива метеоданных со значениями общей облачности, относительной влажности, температуры воз-

<sup>4</sup>ГОСТ Р 55006-2012. Стационарные дизельные и газопоршневые электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Общие технические условия. Введ. 20.09.2012. М.: Стандартинформ, 2014.

<sup>5</sup>ГОСТ Р 55007-2012. Стационарные дизельные и газопоршневые электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Энергоэффективность. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2014.

духа для девяти географических точек на территории России.

Полученная математическая модель [14] имеет следующие величины ошибок прогнозирования: MAE = 123,3 Вт/м<sup>2</sup>, RMSE = 177,9 Вт/м<sup>2</sup> и nRMSE = 16,1%, которые являются результатами тестирования модели на новых (не участвующих при обучении и тестировании модели) данных метеопрогноза (для г. Новочебоксарск метеопровайдера – «Расписание Погоды»<sup>6</sup>).

Указанный подход требует обязательного доступа к данным метеопрогноза, что в условиях реальной эксплуатации СДК не всегда возможно по различным причинам (например, из-за отсутствия интернет-связи, доступа к сайту метеопровайдера и т.п.). В качестве резервного способа получения прогноза прихода СИ используется прямое моделирование с помощью функционала верифицированной библиотеки PVLIV [15], предикторами в этом случае являются период времени, на который осуществляется прогноз, географические координаты места размещения СДК и заранее полученный и локально размещенный в базе данных АСУ ТП ряд актинометрических и метеорологических данных в формате TMY. Например, источником необходимых данных может являться сервис PVGIS<sup>7</sup>, предоставляющий следующую информацию: температура воздуха на высоте два метра над поверхностью земли; относительная влажность; сумма суммарного солнечного излучения, падающего в горизонтальной плоскости; сумма прямого солнечного излучения, падающего в горизонтальной плоскости; сумма диффузного солнечного излучения, падающего в горизонтальной плоскости; скорость и направление ветра на высоте 10 м над поверхностью земли; атмосферное давление.

Процедура выбора состава включенного генерирующего оборудования позволяет определить состав включенных агрегатов и распределение мощности между ними, обеспечивает выполнение условия минимизации удельного расхода топлива на ДЭС, реализованного в виде микросервиса, итерационно работающего на базе программиру-

емого логического контроллера Raspberry Pi.

При одинаковых энергетических характеристиках всех ДГУ, установленных на ДЭС, задача распределения мощности между ними решается просто – ДГУ загружаются равномерно. Это обеспечивает равенство удельных расходов топлива на каждой из включенных под нагрузку машин. При этом достигается максимальная энергетическая эффективность ДЭС в целом. Однако, как только возникает ситуация, в которой ДГУ имеют отличные друг от друга энергетические характеристики (модели используемых ДГУ изначально разные или сказалось влияние режимных и конструктивных факторов), задача поиска наиболее эффективного соотношения мощностей отдельных ДГУ усложняется.

Проведенные в НИУ «МЭИ» исследования показали, что различия между энергетическими характеристиками ДГУ даже одинаковых моделей могут достигать 12%. Необходимая информация была получена экспериментальным путем с использованием имеющегося в составе Макета измерительного оборудования. В процессе получения зависимостей расхода топлива от загрузки ДГУ трижды нагружались в диапазоне от 22 до 95% номинальной мощности, а полученные результаты были в итоге усреднены. Полученные зависимости представлены на рис. 2, дополнительно для сравнения на этом рисунке показаны «смоделированные различными расчетными способами энергетические характеристики<sup>3</sup> для данной модели ДГУ».

При поиске оптимальной стратегии диспетчеризации СДК основными параметрами, которые следует учитывать, являются эффективность и характеристики расхода топлива, наиболее сильно влияющие на экономические показатели проекта. Таким образом, выбранный состав включенного генерирующего оборудования должен обеспечивать минимизацию эксплуатационных издержек за весь рассматриваемый период времени [16, 17], а целевая функция оптимизации может быть записана следующим образом:

<sup>6</sup>Расписание погоды. Режим доступа: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 21.04.2024).

<sup>7</sup>Photovoltaic Geographical Information System. Режим доступа: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en) (дата обращения: 21.04.2024).

$$\min OPEX = \sum_{t=1}^{24} \left( \text{Ц} \cdot \sum_{i=1}^{n_{\text{ДГУ}}} [K_i \cdot N_{\text{ДГy}i}(t) + B_i] \right) \quad (2)$$

где  $t$  – номер расчетного интервала времени (продолжительность интервала принята равной 1 ч, расчетный период времени – 24 ч);  $i = 1 \dots n_{\text{ДГУ}}$  – порядковый номер ДГУ в составе ДЭС; Ц – цена за 1 л дизельного топлива, руб;  $N_{\text{ДГy}i}(t)$  – рабочая мощность  $i$ -й ДГУ в текущем расчетном интервале времени, кВт;  $K_i$  и  $B_i$  – коэффициенты линеаризованной зависимости абсолютного расхода топлива  $i$ -й ДГУ от ее рабочей мощности  $N_{\text{ДГy}i}(t)$ , о.е.

Обычно производители указывают нормы расхода топлива в спецификации двигателя. Для ДЭС, состоящей из нескольких ДГУ, необходимо использовать индивидуальные характеристики расхода топлива. Пример таких характеристик для ДЭС, входящей в состав Макета, приведен на рис. 2.

Как видно из рис. 2, зависимость абсолютного расхода топлива  $Q$  от загрузки ДГУ  $N_{\text{ДГУ}}$  имеет линейный характер:  $Q = K \cdot N_{\text{ДГУ}} + B$ , в соотношении коэффициенты  $K$  и  $B$  в первом

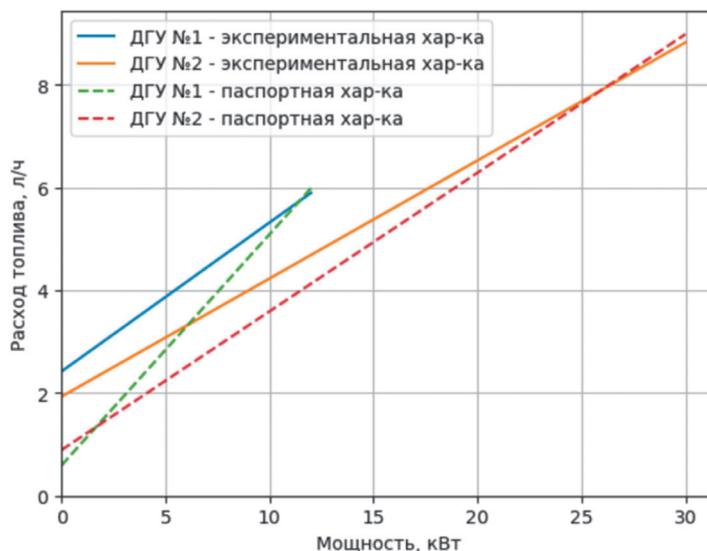
приближении могут быть получены из спецификации производителя, а более точно – из анализа данных энергетических испытаний. Соответствующие коэффициенты кривой расхода топлива для обеих ДГУ Макета приведены в табл. 2.

При работе СДК должны соблюдаться следующие ограничения, формирующие задачу оптимизации:

1. В каждый расчетный интервал времени должно выполняться уравнение баланса мощности:

$$\sum_{i=1}^{n_{\text{ДГУ}}} N_{\text{ДГy}i}(t) + \sum_{j_1}^{n_{\text{ИНВ}}} N_{\text{PVI}j_1}(t) - \sum_{k=1}^{n_{\text{бат.инв}}} N_{\text{СНЭ}k}^{\text{зар}}(t) + \sum_{k=1}^{n_{\text{бат.инв}}} N_{\text{СНЭ}k}^{\text{разр}}(t) = P(t), \quad (3)$$

где  $P(t) = P_{\text{потр}}(t) + P_{\text{СН}}(t)$  – прогнозная суммарная активная нагрузка, определяемая полезной нагрузкой потребителей энергии и собственными нуждами СДК, кВт;  $N_{\text{PVI}j_1}(t)$  – прогнозная мощность, вырабатываемая солнечной электростанцией, кВт;  $N_{\text{СНЭ}k}^{\text{зар/разр}}(t)$  –



**Рис. 2.** Кривые расхода топлива для дизель-генераторных установок Макета солнечно-дизельных комплексов  
**Fig. 2.** Fuel consumption curves for diesel generator installations of the solar-diesel complex Layout

**Таблица 2.** Коэффициенты кривой расхода топлива  
**Table 2.** Coefficients of the fuel consumption curve

ДГУ	Паспортные данные		Экспериментальные данные	
	$K$ , о.е.	$B$ , о.е.	$K$ , о.е.	$B$ , о.е.
ДГУ 12 кВт	0,45	0,59	0,29	2,42
ДГУ 30 кВт	0,27	0,89	0,23	1,93

зарядная/разрядная мощность системы накопления энергии, кВт;  $k = 1 \dots n_{\text{инв}}$  – порядковый номер солнечного инвертора;  $k = 1 \dots n_{\text{бат.инв}}$  – порядковый номер батарейного инвертора.

2. Готовность к работе  $i$ -й ДГУ в течение всего расчетного периода  $T$ :

$$a_{\text{ДГУ}i} \cdot N_{\text{ДГУ}i}(t) - N_{\text{ДГУ}i}(t) = 0, \quad (4)$$

где  $a_{\text{ДГУ}i}$  – бинарный коэффициент доступности  $i$ -й ДГУ в момент времени  $t$ .

3. Производители дизельных генераторов рекомендуют избегать использования генераторов с мощностью менее 25–30% от их номинальной выходной мощности<sup>10</sup>. Работа дизель-генератора на более низкой выходной мощности снижает его эффективность и может привести к более частым работам по техническому обслуживанию из-за негативного воздействия на работу дизельного двигателя. Таким образом, рабочая мощность ДГУ в каждый момент времени должна быть больше минимально допустимой и меньше максимально-допустимой мощности:

$$N_{\text{ДГУ}i}^{\text{min}} \leq N_{\text{ДГУ}i}(t) \leq N_{\text{ДГУ}i}^{\text{max}}. \quad (5)$$

Это ограничение также может быть записано следующим образом – удельная загрузка  $i$ -й работающей ДГУ в момент времени  $t$  должна быть больше или равна  $N_{\text{ДГУ}}^{\text{уд}^{\text{min}}} = N_{\text{ДГУ}i}^{\text{min}} / N_{\text{ДГУ}i}^{\text{max}}$ :

$$\begin{cases} u_{\text{ДГУ}i}(t) = 1 \\ N_{\text{ДГУ}i}(t) / N_{\text{ДГУ}i}^{\text{max}} \geq N_{\text{ДГУ}}^{\text{уд}^{\text{min}}}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $u_{\text{ДГУ}i}(t)$  – бинарный коэффициент доступности  $i$ -й ДГУ в момент времени  $t$  (1 – ДГУ доступна; 0 – ДГУ недоступна).

4. Частые пуски и остановки генератора увеличивают износ дизельной генераторной установки. Таким образом, ограничение минимального времени включения и простоя дизельной генераторной установки благотворно влияет на минимизацию затрат на техническое обслуживание. Ограничения на минимальное время включения и простоя могут быть сформулированы описанным ниже образом [18].

Ограничение по частоте пусков и остановов ДГУ сформулировано на основе крите-

рия минимизации затрат на пуски и остановки. Затраты на пуск  $i$ -й ДГУ:

$$SU_i(t) \geq SU_i \cdot (u_{\text{ДГУ}i} - u_{\text{ДГУ}i-1}), \quad (7)$$

где  $SU_i$  – затраты на пуск  $i$ -го дизель-генератора, руб.

Затраты на останов  $i$ -й ДГУ:

$$SD_i(t) \geq SD_i \cdot (u_{\text{ДГУ}i} - u_{\text{ДГУ}i-1}), \quad (8)$$

где  $SD_i$  – затраты на останов  $i$ -го дизель-генератора, руб.

5. В случае начала работы (запуска)  $i$ -я ДГУ должна последовательно работать не менее заданного числа часов:

$$[h_i^{\text{up}}(t-1) - T_i^{\text{up}}] \cdot (u_{\text{ДГУ}i} - u_{\text{ДГУ}i-1}) \geq 0, \quad (9)$$

где  $h_i^{\text{up}}(t-1)$  – число последовательных часов в течение которых  $i$ -я ДГУ была в работе на момент окончания предыдущего расчетного интервала времени –  $(t-1)$ -го часа;  $T_i^{\text{up}}$  – минимально допустимое число последовательных часов работы  $i$ -й ДГУ.

Минимальное число последовательных часов простоя  $i$ -й ДГУ:

$$\begin{aligned} [h_i^{\text{down}}(t-1) - T_i^{\text{down}}] \times \\ \times (u_{\text{ДГУ}i} - u_{\text{ДГУ}i-1}) \geq 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $h_i^{\text{down}}(t-1)$  – число последовательных часов в течение которых  $i$ -я ДГУ простаивала на момент окончания предыдущего расчетного интервала времени –  $(t-1)$ -го часа;  $T_i^{\text{down}}$  – минимально допустимое число последовательных часов простоя  $i$ -й ДГУ.

6) Готовность к работе СНЭ:

$$a_{\text{СНЭ}k} \cdot N_{\text{СНЭ}k}^{\text{зар/разр}}(t) - N_{\text{СНЭ}k}^{\text{зар/разр}}(t) = 0, \quad (11)$$

где  $a_{\text{СНЭ}k}$  – бинарный коэффициент доступности  $k$ -й СНЭ в момент времени  $t$ .

7) Поддержание уровня заряда СНЭ в допустимых пределах [4, 19, 20]:

$$\begin{aligned} (1 - DOD_k^{\text{min}}) \leq \eta_k^{\xi} \cdot SOC_k(t-1) + \\ + \frac{100 \cdot \Delta t}{C_k} \cdot \left( N_{\text{СНЭ}k}^{\text{зар}}(t) \eta_k^{\text{зар}} + \frac{N_{\text{СНЭ}k}^{\text{разр}}(t)}{\eta_k^{\text{разр}}} \right) \leq (12) \\ \leq SOC_k^{\text{max}}, \end{aligned}$$

<sup>10</sup>ГК ТСС: правильный выбор дизельной генераторной установки. Режим доступа: [https://xn--80aaigboe2bzaiqsf7i.xn--p1ai/upload/articles/pdf/sphereoilandgas\\_2019-5\\_tss.pdf](https://xn--80aaigboe2bzaiqsf7i.xn--p1ai/upload/articles/pdf/sphereoilandgas_2019-5_tss.pdf) (дата обращения: 10.04.2024).

где  $\eta_k^s$  – коэффициент саморазряда  $k$ -й СНЭ, %;  $C_k$  – емкость  $k$ -й СНЭ, кВт·ч;  $DOD_k^{min}$  – минимально допустимая глубина разряда, %;  $SOC_k$  – уровень заряда  $k$ -й СНЭ, %;  $\eta_k^{зар}$ ,  $\eta_k^{разр}$  – КПД СНЭ при заряде и разряде АКБ, %.

8. Ограничение допустимой скорости (мощности) разряда/заряда  $k$ -й СНЭ:

$$\begin{aligned} N_{СНЭk}^{зар}(t) &\leq N_{СНЭk}^{зарmax}; \\ N_{СНЭk}^{разр}(t) &\leq N_{СНЭk}^{разрmax}, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $N_{СНЭk}^{зарmax}$ ,  $N_{СНЭk}^{разрmax}$  – максимально-допустимые значения мощности заряда и разряда  $k$ -й СНЭ.

9. Невозможность одновременного разряда и заряда СНЭ:

$$N_{СНЭk}^{зар}(t) \cdot N_{СНЭk}^{разр}(t) = 0. \quad (14)$$

10. Готовность к работе  $j$ -го инвертора СЭС:

$$a_{СЭСj} \cdot N_{PVi}(t) - N_{PVi}(t) = 0, \quad (15)$$

где  $a_{СЭСj}$  – бинарный коэффициент доступности  $j$ -го инвертора СЭС в момент времени  $t$ .

В связи с указанными техническими ограничениями на режимы работы оборудования СДК и видом целевой функции, задача выбора состава включенного генерирующего оборудования относится к задачам смешанного целочисленного нелинейного программирования (MINLP).

Для решения задач смешанного целочисленного нелинейного программирования может быть использовано достаточно большое количество программных продуктов. К свободно распространяемым решениям относится библиотека Puomo для языка программирования Python, представляющая интерфейс ко многим решателям оптимизационных задач:

1. Couenne, IPOPT – свободно распространяемые решатели задач нелинейного программирования.

2. SNOPT, CONOPT – коммерческие решатели задач нелинейного программирования.

Основная цель оптимизации планирования заключается в нахождении набора диспетчерских решений, при которых эксплуатационные расходы на СДК минимизируются, и выполняются все ограничения. Для решения поставленной оптимизационной задачи использовался решатель Couenne.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Чтобы проиллюстрировать способ решения задачи прогнозирования оптимального режима работы СДК с использованием предложенной формулировки, был рассмотрен пример СДК, показанный на рис. 1, с параметрами, указанными в табл. 1.

В этом исследовании используются почасовые данные о солнечной радиации за четыре характерных дня в соответствии с данными ТМУ из геоинформационной системы PVGIS и данные об электрической нагрузке для типичного автономного потребителя, расположенного на территории Дальневосточного федерального округа.

Режим работы СДК за каждый «характерный» день был рассчитан двумя способами:

1) без выполнения оптимизации суточного плана работы и с использованием паспортных характеристик расхода топлива ДГУ;

2) с учетом реальных топливных характеристик ДГУ выполнялась оптимизация планового суточного режима работы.

Численные результаты расчетов приведены в табл. 3. Пример суточного режима работы СДК с указанием периодов работы

**Таблица 3.** Сравнительные результаты режимов работы солнечно-дизельного комплекса

**Table 3.** Comparative results of solar-diesel complex operating modes

День	Оптимизация режима работы СДК	Выработка энергии СЭС, кВт·ч в день	Выработка энергии ДЭС, кВт·ч в день	Расход топлива, л	$\delta$ , %
Характерный зимний день	нет	9,19	835,26	296,95	-3,65
	да	9,99	845,75	307,79	
Характерный день весенне-осеннего периода	нет	51,78	661,43	227,09	-14,51
	да	56,29	668,21	260,03	
Характерный летний день	нет	57,15	183,12	117,97	-30,24
	да	58,74	192,91	153,64	

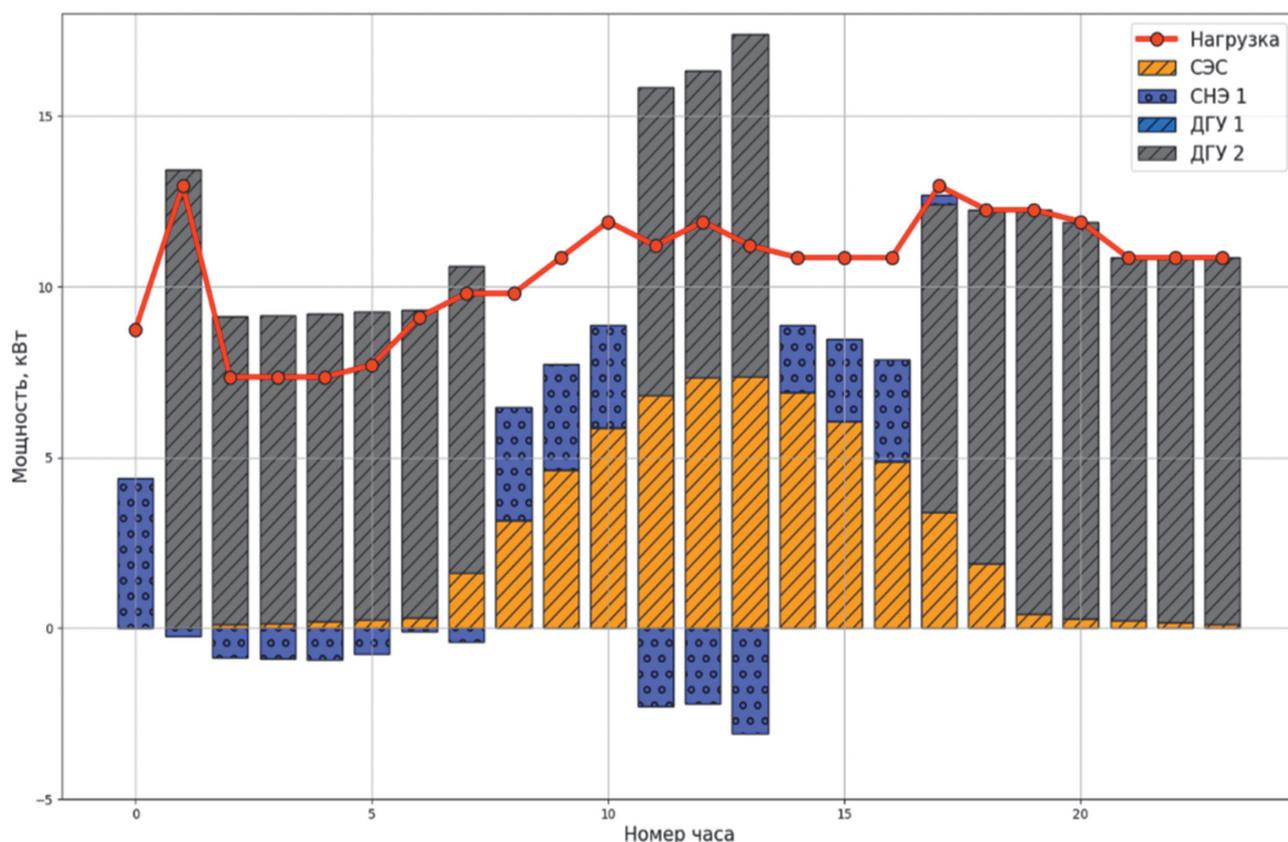


Рис. 3. Пример суточного режима работы солнечно-дизельного комплекса

Fig. 3. An example of solar-diesel complex daily operating mode

основного энергетического оборудования в графическом виде представлен на рис. 3.

Анализ приведенных в табл. 3 результатов моделирования суточного режима работы СДК показывает:

- за характерный зимний день расход топлива может быть уточнен на 3,65%;
- за характерный день весенне-осеннего периода расход топлива может быть уточнен на 14,51%;
- за характерный летний день расход топлива может быть уточнен на 30,24%.

Таким образом, при упрощенном методе управления режимом работы без проведения его предварительной оптимизации и без учета реальных энергетических характеристик ДГУ такой важнейший показатель работы, как расход топлива (напрямую влияющий на экономическую эффективность про-

екта СДК), может быть занижен на величину до одной трети, что даст инвестору неверное представление об экономической эффективности проекта.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ выбора состава включенного генерирующего оборудования СДК отличается от существующих тем, что учитывает прогноз солнечного излучения на весь период планирования, а также обеспечивает оптимальное распределение мощности между ДГУ дизельной электростанции с учетом их индивидуальных характеристик.

Анализ полученных результатов показал, что использование предложенного способа определения режима работы СДК приводит, соответственно, к уточнению эффективности на величину до 30%.

### Список источников

1. Belila A., Benbouzid M., Berkouk E.-M., Amirat Y. On energy management control of a PV-diesel-ESS based microgrid in a stand-alone context // Energies. 2018. Vol. 11. Iss. 8. P. 2164. <https://doi.org/10.3390/en11082164>.
2. Mohamed M.M., Zoghby H.M.El., Sharaf S.M., Mosa M.A. Optimal virtual synchronous generator control of battery/supercapacitor hybrid energy storage system for frequency response enhancement of photovoltaic/diesel microgrid // Journal of Energy Storage. 2022. Vol. 51. P. 104317. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104317>.

3. Виноградов А.А. Анализ влияния непропорционального распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами на коэффициент мощности нагрузки каждого генератора // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2018. Т. 10. № 2. С. 411–419. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2018-10-2-411-419>. EDN: XOOCUH.
4. Djohra S., Aries N. Cost optimization of a wind-solar-diesel system with battery storage // Journal of Renewable Energies. 2022. Vol. 25. Iss. 1. P. 127–151. <https://doi.org/10.54966/jreen.v25i1.1076>.
5. King D.L., Boyson W.E., Kratochvil J.A. Photovoltaic array performance model. 2004. Режим доступа: <https://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/043535.pdf> (дата обращения: 30.09.2024).
6. Soto W., Klein S., Beckman W. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance // Solar Energy. 2006. Vol 80. P. 78-88. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2005.06.010>.
7. King D.L., Gonzalez S., Galbraith G.M., Boyson W.E. Performance model for grid-connected photovoltaic inverters. 2007. <https://doi.org/10.2172/920449>.
8. Diaf S., Diaf D., Belhamel M., Haddadi M., Louche A. A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system // Energy Policy. 2007. Vol. 35. Iss. 11. P. 5708–5718. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.06.020>.
9. Марьенков С.А. Применение технологии накопления электрической энергии для увеличения надежности системы электроснабжения на базе возобновляемых источников электрической энергии // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 6-2. С. 103–107. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.48.094>.
10. Булатов Р.В., Насыров Р.Р., Бурмейстер М.В. Применение систем накопления электроэнергии для повышения коэффициента использования установленной мощности электростанций на базе возобновляемых источников энергии в составе электрических систем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 6. С. 74–80. EDN: XKDFJJ.
11. Елистратов В.В., Конищев М.А., Денисов Р.С., Богун И.В. Арктическая ветродизельная электростанция с интеллектуальной системой автоматического управления // Электричество. 2022. № 2. С. 29–37. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-2-29-37>. EDN ZWLNQR.
12. Карамов Д.Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 9. С. 133–140. EDN: UJWFLH.
13. Рыбаков В.В., Пешехонов Н.Е., Воронин А.Е. К вопросу повышения эффективности функционирования дизельных электростанций // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 9. С. 488–494. EDN: VLBIYU.
14. Narynbaev A.F., Kremer V.A., Vaskov A.G. Evaluating day-ahead solar radiation forecasts from ICON, GFS, and MeteoFrance global NWP models // Applied Solar Energy. 2024. Vol. 60. No. 3. P. 491–500. <https://doi.org/10.3103/S0003701X24600152>.
15. Holmgren W.F., Hansen C.W., Mikofski M.A. Pvlib python: a python package for modeling solar energy systems // The Journal of Open Source Software. 2018. No. 3. P. 884. <https://doi.org/10.21105/joss.00884>.
16. Лаврик А.Ю., Жуковский Ю.Л., Лаврик А.Ю., Будыско А.Д. Особенности выбора оптимального состава ветро-солнечной электростанции с дизельными генераторами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 10–17. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-10-17>.
17. Kusakana K. Daily operation cost minimization of photovoltaic-diesel-battery hybrid systems using different control strategies // IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Yokohama, 9–12 November 2015). Yokohama: IEEE, 2015. P. 003609–003613. <https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392661>.
18. Orero S.O., Irving M.R. Large scale unit commitment using a hybrid genetic algorithm // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 1997. Vol. 19. Iss. 1. P. 45–55. [https://doi.org/10.1016/S0142-0615\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0142-0615(96)00028-2).
19. Sidorov D., Muftahov I., Tomin N., Karamov D., Panasetsky D., Dreglea A. A dynamic analysis of energy storage with renewable and diesel generation using Volterra equations // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2020. Vol. 16. Iss. 5. P. 3451–3459. <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2932453>.
20. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic-diesel-battery stand-alone systems minimising system weight // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 119. P. 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.050>.

### References

1. Belila A., Benbouzid M., Berkouk E.-M., Amirat Y. On energy management control of a PV-diesel-ESS based microgrid in a stand-alone context. *Energies*. 2018;11(8):2164. <https://doi.org/10.3390/en11082164>.
2. Mohamed M.M., Zoghby H.M.El., Sharaf S.M., Mosa M.A. Optimal virtual synchronous generator control of battery/supercapacitor hybrid energy storage system for frequency response enhancement of photovoltaic/diesel microgrid. *Journal of Energy Storage*. 2022;51:104317. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104317>.
3. Vinogradov A.A. Analysis of influence of non-proportional distribution of load between parallelly operating generators for the power factor of loading of each generator. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo*

- i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2018;10(2):411-419. (In Russ.). <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2018-10-2-411-419>. EDN: X00CUH.
4. Djohra S., Aries N. Cost optimization of a wind-solar-diesel system with battery storage. *Journal of Renewable Energies*. 2022;25(1):127-151. <https://doi.org/10.54966/jreen.v25i1.1076>.
  5. King D.L., Boyson W.E., Kratochvil J.A. Photovoltaic array performance model. Available from: <https://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/043535.pdf> [Accessed 30th September 2024].
  6. Soto W., Klein S., Beckman W. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*. 2006;80:78-88. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2005.06.010>.
  7. King D.L., Gonzalez S., Galbraith G.M., Boyson W.E. Performance model for grid-connected photovoltaic inverters. 2007. <https://doi.org/10.2172/920449>.
  8. Diaf S., Diaf D., Belhamel M., Haddadi M., Louche A. A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system. *Energy Policy*. 2007;35(11):5708-5718. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.06.020>.
  9. Marenkov S.A. Applying of electrical energy storage technologies to increase the reliability of power system based on renewable energy sources. *International Research Journal*. 2016;6-2:103-107. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.48.094>.
  10. Bulatov R.V., Nasyrov R.R., Burmeyster M.V. Application of energy storage systems for the purpose of improving the installed capacity utilization factor of power plants based on renewable energy sources within electric systems. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2021;6:74-80. (In Russ.). EDN: XKDFJJ.
  11. Elistratov V.V., Konishchev M.A., Denisov R.S., Bogun I.V. An Arctic wind-diesel power plant with an intelligent automatic control system. *Elektrichestvo*. 2022;2:29-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-2-29-37>. EDN ZWLNQR.
  12. Karamov D.N. Mathematical modeling of an autonomous power supply system using renewable energy sources. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;9:133-140. (In Russ.). EDN: UJWFLH.
  13. Rybakov V.V., Peshekhonov N.E., Voronin A.E. On the issue of improving the efficiency of diesel power plants. *Proceedings of the Tula State University*. 2020;9:488-494. (In Russ.). EDN: VLBIYU.
  14. Narynbaev A.F., Kremer V.A., Vaskov A.G. Evaluating day-ahead solar radiation forecasts from ICON, GFS, and MeteoFrance global NWP models. *Applied Solar Energy*. 2024;60(3):491-500. <https://doi.org/10.3103/S0003701X24600152>.
  15. Holmgren W.F., Hansen C.W., Mikofski M.A. Pylib python: a python package for modeling solar energy systems. *The Journal of Open Source Software*. 2018;3:884. <https://doi.org/10.21105/joss.00884>.
  16. Lavrik A.Y., Zhukovsky Y.L., Lavrik A.Y., Buldysko A.D. Features of the optimal composition of a wind-solar power plant with diesel generators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):10-17. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-10-17>.
  17. Kusakana K. Daily operation cost minimization of photovoltaic-diesel-battery hybrid systems using different control strategies. In: *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 9–12 November 2015, Yokohama. Yokohama: IEEE; 2015, p. 003609-003613. <https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392661>.
  18. Orero S.O., Irving M.R. Large scale unit commitment using a hybrid genetic algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 1997;19(1):45-55. [https://doi.org/10.1016/S0142-0615\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0142-0615(96)00028-2).
  19. Sidorov D., Muftahov I., Tomin N., Karamov D., Panasetsky D., Dreglea A. A dynamic analysis of energy storage with renewable and diesel generation using Volterra equations. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020;16(5):3451-3459. <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2932453>.
  20. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic-diesel-battery stand-alone systems minimising system weight. *Energy Conversion and Management*. 2016;119:279-288. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.050>.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Васьков Алексей Геннадьевич**,  
к.т.н.,  
доцент кафедры гидроэнергетики и  
возобновляемых источников энергии,  
Национальный исследовательский  
университет «МЭИ»,  
111250, г. Москва,  
ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1, Россия  
✉ [VaskovAG@mpei.ru](mailto:VaskovAG@mpei.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-4664-8008>

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Aleksey G. Vaskov**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department  
of Hydropower and Renewable Energy Sources,  
National Research University "Moscow Power  
Engineering Institute",  
14/1, Krasnokazarmennaya St., Moscow  
111250, Russia  
✉ [VaskovAG@mpei.ru](mailto:VaskovAG@mpei.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-4664-8008>

**Заявленный 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 20.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 10.11.2024 г.; принята к публикации 13.11.2024 г.

**Author contribution**

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 declares no conflict of interests.

*The final manuscript has been read and approved by the author.*

**Information about the article**

The article was submitted 20.10.2024; approved after reviewing 10.11.2024; accepted for publication 13.11.2024.

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья  
УДК 536.2:519.63  
EDN: QQKRIP  
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-563-572



## Численное моделирование процесса расплавления цилиндрического образца с локализованным источником тепловыделения

И.Г. Донской<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия

**Резюме.** Целью работы является определение условий начала плавления и полного расплавления образца (в стационарной постановке), а также исследование динамических режимов распространения фронта плавления при разных значениях теплофизических параметров (интенсивность нагрева и охлаждения, изменение свойств материала при плавлении, геометрические характеристики образца). В качестве инструмента исследования используется численная модель процесса теплопроводности в неоднородной среде. Для численного решения нестационарные одномерные уравнения теплопереноса приводятся к разностному виду, фазовый переход учитывается с помощью энтальпийной схемы, процессы плавления и теплопроводности расщепляются для улучшения устойчивости численного метода. Параметры варьируются для определения зависимости характерных времен начала плавления и полного расплавления образца от условий проведения процесса. С помощью численной модели рассчитаны траектории достижения стационарных состояний, решения для которых получены в первой части статьи. Показано, что скорость плавления существенно зависит, помимо интенсивности теплоподвода и теплового эффекта плавления, от отношения коэффициентов температуропроводности фаз. Для стационарных условий получены критические значения безразмерных параметров, отражающих относительную интенсивность теплообмена и тепловыделения: эти значения связаны с эффективными термическими сопротивлениями теплоизолирующего слоя и теплоотдачи в окружающую среду. Модель позволяет рассчитывать динамику плавления при малых теплотах плавления (больших значениях числа Стефана), когда квазистационарное приближение становится неприменимым (т.е. когда характерное время перемещения фронта плавления сопоставимо или меньше времени тепловой релаксации). Проведенные расчеты могут быть использованы при оценке термомеханической устойчивости материалов при нагреве за счет внутреннего локального источника энергии (например, джоулевой теплоты). Разработанная численная модель дает возможность исследовать процессы плавления в широком диапазоне условий.

**Ключевые слова:** фазовые переходы, численное моделирование, задача Стефана

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0005) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

**Для цитирования:** Донской И.Г. Численное моделирование процесса расплавления цилиндрического образца с локализованным источником тепловыделения // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 563–572. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-563-572>. EDN: QQKRIP.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Numerical simulation of the melting process of a cylindrical sample with a localized heat source

Igor G. Donskoy<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The work set out to determine the conditions for the onset of melting and complete melting of the sample (in a stationary setting), as well as to study the dynamic modes of propagation of the melting front at different thermophysical parameters (heating and cooling intensity, change in material properties during melting, geometric characteristics of the sample). A numerical model of the heat conduction process in a heterogeneous medium is

used as a research tool. For the numerical solution, non-stationary one-dimensional heat transfer equations are reduced to a differential form, taking the phase transition into account using an enthalpy scheme; in order to improve the stability of the numerical method, the melting and heat conduction processes are separated. The parameters are varied to determine the dependence of the characteristic times of the onset of melting and complete melting of the sample on the process conditions. The trajectories for reaching stationary states, whose solutions were obtained in the first part of the article, were calculated using a numerical model. The melting rate is shown to depend significantly on the ratio of the thermal diffusivity coefficients of the phases, as well as the intensity of heat supply and the thermal effect of melting. Critical values of dimensionless parameters reflecting the relative intensity of heat exchange and heat release obtained for stationary conditions are associated with the effective thermal resistances of the heat-insulating layer and heat transfer to the environment. The model can be used to calculate the dynamics of melting at low enthalpies of fusion (large values of the Stefan number), when the quasi-stationary approximation becomes inapplicable (i.e., when the characteristic time of movement of the melting front is comparable to or less than the thermal relaxation time). The calculations can be used to assess the thermomechanical stability of materials when heated by an internal local energy source (for example, Joule heat). The developed numerical model can be used to investigate melting processes under a wide range of conditions.

**Keywords:** phase transitions, numerical modeling, Stefan problem

**Acknowledgements.** The research was carried out under the State Assignment Project (no. FWEU-2021-0005) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation for the period from 2021 to 2030 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no 13.ЦКП.21.0038).

**For citation:** Donskoy I.G. Numerical simulation of the melting process of a cylindrical sample with a localized heat source. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):563-572. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-563-572>. EDN: QQKRIP.

## ВВЕДЕНИЕ

Плавление материалов в теплонапряженных элементах может быть как результатом аварийного режима, так и целевым процессом. Например, плавящиеся материалы применяются для регулирования тепловых режимов работы электрохимических устройств [1] и для запасания тепловой энергии [2]. Наоборот, расплавление оболочек (например, электроизоляции [3] или мембран [4]) является нежелательным явлением. Однако и в тех, и в других случаях протекающие теплофизические процессы схожи, и их описание возможно с помощью общих физико-математических моделей. Одной из таких моделей посвящена настоящая статья.

Фазовые переходы исследовались с помощью численных моделей в большом числе работ (например, в задачах прогрева породы [5, 6], зажигания и горения полимеров [7, 8], распространения волн реагирования [9, 10], электрообработки материалов [11], термомеханической устойчивости стержней [12, 13], спекания частиц в зернистых слоях [14–16], свободной конвекции в многофазных пористых средах [17, 18]). Задачи, связанные с запасанием тепловой энергии путем плавления материала в концентрических областях, рассматривались в ряде работ. Авторы [19] численно исследовали влияние асимметрии области на скорость расплавления вещества. Авторы [20] проводили эксперименты для из-

мерения динамики межфазной поверхности в горизонтальном канале. В работе [21] предложена квазистационарная модель, позволяющая оценить время расплавления цилиндра с разными условиями теплообмена на внешней поверхности. Эти результаты, однако, применимы только для малых чисел Стефана (т.е. когда распределение температур в однофазных областях устанавливается быстрее движения фронта плавления).

В этих работах, как правило, рассматриваются конкретные приложения. Детализация моделей неизбежно приводит к усложнению расчетов (учет зависимости теплофизических свойств от температуры делает задачу нелинейной; в жидкофазной области возможно развитие конвективной неустойчивости, а значит, нужно решать задачу с течением расплава; электрическая проводимость материалов зависит от температуры и т.д.). В настоящей работе рассматривается более простая задача, с двумя фазами и постоянными теплофизическими свойствами в пределах каждой из фаз, при этом конвективные течения в расплавленной фазе не учитываются (т.е. предполагается, что вязкость слишком велика, чтобы развились свободно-конвективные течения). Такая постановка позволяет получить точное решение стационарной задачи Стефана, благодаря чему оказывается возможным исследовать критические режимы нагрева плавящихся

образцов с помощью нестационарной численной модели. Качественные результаты, полученные таким образом, могут быть полезны при исследовании систем с наложением нелинейных и конвективных эффектов.

### СТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА

Рассмотрим образец с нагревательным элементом внутри и охлаждением снаружи. На поверхности нагревателя задан постоянный тепловой поток, на внешней границе – граничные условия третьего рода. Нагреватель считаем высокотеплопроводным, так что градиент температуры на границе между нагревателем и теплоизоляцией определяется только интенсивностью теплового потока.

Стационарное уравнение теплопроводности в слое теплоизоляции выглядит следующим образом [22]:

$$\frac{d}{dr} \left( r^n \frac{dT}{dr} \right) = 0, \quad (1)$$

где  $r$  – координата;  $T$  – температура;  $n$  – геометрический фактор (0 для пластины, 1 для цилиндра, 2 для шара). На внутренней границе:

$$-\lambda \frac{dT}{dr}(r_0) = q_h, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $r_0$  – положение границы между нагревателем и нагреваемой областью;  $q_h$  – заданный тепловой поток. На внешней границе:

$$-\lambda \frac{dT}{dr}(R) = \alpha(T - T_{env}), \quad (3)$$

где  $R$  – положение внешней границы;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $T_{env}$  – температура охлаждения.

При достаточно большой величине теплового потока  $q_h$  температура теплоизоляции может достичь температуры плавления (считаем, что материал нагревателя при этом не плавится). Тогда необходимо рассматривать двухфазную задачу теплопроводности, в которой коэффициент теплопроводности зависит от фазы материала, а на границе между фазами выполняется условие Стефана:

$$\lambda_l \frac{dT_l}{dr}(r_m) = \lambda_s \frac{dT_s}{dr}(r_m), \quad T_l(r_m) = T_s(r_m) = T_m, \quad (4)$$

где индекс  $l$  относится к фазе расплава, индекс  $s$  – к твердой фазе;  $r_m$  – положение меж-

фазной границы,  $T_m$  – температура плавления.

Если температурной зависимостью коэффициента теплопроводности можно пренебречь, по сравнению с его изменением при фазовом переходе, то все записанные выше уравнения можно представить в безразмерном виде.

$$\frac{d}{d\xi} \left( \xi^n \frac{d\theta_{l,s}}{d\xi} \right) = 0; \quad (1a)$$

$$-\kappa \frac{d\theta_l}{d\xi} = Ki, \quad \xi = 1; \quad (2a)$$

$$-\frac{d\theta_s}{d\xi} = Bi\theta_s, \quad \xi = 1 + \Delta; \quad (3a)$$

$$\kappa \frac{d\theta_l}{d\xi} = \frac{d\theta_s}{d\xi}, \quad \theta_l = \theta_s = 1, \quad \xi = \xi_m. \quad (4a)$$

Здесь  $\xi$  – безразмерная координата;  $\theta$  – безразмерная температура;  $Ki$  – число Кирпичева;  $Bi$  – число Био;  $\kappa$  – отношение теплопроводностей фаз;  $\Delta$  – безразмерная толщина изоляции:

$$\xi = \frac{r}{r_0}, \quad \theta = \frac{T - T_{env}}{T_m - T_{env}}, \quad \kappa = \frac{\lambda_l}{\lambda_s},$$

$$Ki = \frac{q_h r_0}{\lambda_s (T_m - T_{env})}, \quad Bi = \frac{\alpha r_0}{\lambda_s}, \quad (5)$$

$$\Delta = \frac{R - r_0}{r_0}.$$

Нас интересует положение границы плавления в зависимости от интенсивности нагрева и охлаждения. Как можно видеть, решение задачи не зависит от многих свойств материала (таких как скрытая теплота фазового перехода, теплоемкость), что, однако, вполне естественно ожидать в стационарной постановке.

Основным управляющим параметром при нагреве является интенсивность подвода теплоты, т.е. число Кирпичева  $Ki$ . В отношении фазового перехода можно выделить два критических значения этого параметра, а именно нижнее критическое значение, соответствующее началу плавления, которое мы будем обозначать  $Ki^*$ ; и верхнее критическое значение, при котором происходит полное расплавление образца,  $Ki^{**}$ . Задача сводится, таким образом, к определению критических значений интенсивности подвода теплоты для плавящихся стенок с разной геометрией.

Рассмотрим образец с цилиндрической симметрией (этот случай представляет наибольший практический интерес). Общее решение задачи теплопроводности (1а) выглядит следующим образом<sup>2</sup>:

$$\theta = C_1 \ln \xi + C_2. \quad (6)$$

Для области  $\xi < \xi_m$  с граничными условиями (2а) можно записать решение в виде:

$$\theta_l = 1 + \frac{Ki}{\kappa} \ln \left( \frac{\xi_m}{\xi} \right). \quad (7)$$

В области  $\xi > \xi_m$  распределение температуры выглядит так:

$$\theta_s = 1 + \frac{\ln \left( \frac{\xi_m}{\xi} \right)}{\ln \left( \frac{1+\Delta}{\xi_m} \right) + \frac{1}{Bi(1+\Delta)}}. \quad (8)$$

Из условия Стефана тогда получаем формулу для положения границы фазового перехода:

$$\xi_m = (1+\Delta) \exp \left[ -\frac{1}{Ki} + \frac{1}{Bi(1+\Delta)} \right]. \quad (9)$$

Отсюда можно найти критические значения параметров  $Ki$  и  $Bi$ .

Началу плавления, т.е. условию  $\xi_m = 1$ , соответствует соотношение:

$$Ki^* = \frac{1}{\ln(1+\Delta) + \frac{1}{Bi(1+\Delta)}}. \quad (10)$$

Расплавление изоляции происходит при  $\xi_m = 1 + \Delta$ ; этому условию соответствует другое критическое соотношение:

$$Ki^{**} = Bi(1+\Delta). \quad (11)$$

В пределе высокой скорости теплоотдачи либо большой толщины теплоизоляции критическое значение  $Ki^*$  не зависит от  $Bi$ , а критическое значение  $Ki^{**}$  растет с числом  $Bi$  линейно. Интересно, что при фиксированном значении  $Bi$  критическое значение  $Ki^*$  уменьшается с  $\Delta$ , в то время как  $Ki^{**}$  растет. Это связано с увеличением теплового со-

противления слоя теплоизоляции: условие (10) представляет собой известный закон сложения тепловых сопротивлений для цилиндрической стенки<sup>3</sup>. Условие (11) совпадает по форме с условиями расплавления элементов с объемным тепловыделением [22]. С увеличением толщины слоя теплоизоляции влияние теплоотдачи на условия вблизи нагревателя снижается. Отметим также, что оба критических значения не зависят от теплопроводности расплавленной фазы.

Аналогичный расчет для плоской симметрии дает:

$$\xi_m = 1 + \Delta + \frac{1}{Bi} - \frac{1}{Ki}, \quad (12)$$

откуда:

$$Ki^* = \frac{1}{\Delta + \frac{1}{Bi}}; \quad Ki^{**} = Bi. \quad (13)$$

Для сферической симметрии соответственно:

$$\xi_m = \frac{1}{\frac{1}{Ki} + \frac{1}{1+\Delta} \left[ 1 - \frac{1}{Bi(1+\Delta)} \right]}; \quad (14)$$

$$Ki^* = \frac{1+\Delta}{\Delta + \frac{1}{Bi(1+\Delta)}}; \quad Ki^{**} = Bi(1+\Delta)^2. \quad (15)$$

Как видно из формул, зависимость  $Ki^*$  от числа Био для всех случаев исчезает в пределе большой интенсивности теплоотдачи. При больших толщинах  $\Delta$  нижнее критическое число Кирпичева для плоского образца становится исчезающе мало; для цилиндрической симметрии, как было показано выше, падение оказывается логарифмическим; наконец, для образца со сферической симметрией  $Ki^*$  стремится к постоянному значению, точнее, к единице. Зависимость верхнего критического значения числа Кирпичева от чисел  $Bi$  и  $\Delta$  можно обобщить формулой:

$$Ki^{**} = Bi(1+\Delta)^n. \quad (16)$$

<sup>2</sup>Полянин А.Д., Вязьмин А.В., Журов А.И., Казенин Д.А. Справочник по точным решениям уравнений тепло- и массопереноса. М.: Факториал, 1998. 368 с.

<sup>3</sup>Григорьев В.А., Зорин В.М. Теплоэнергетика и теплотехника: справочная серия. В 4 кн.; кн. 2. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. М.: Энергоатомиздат, 1988. 560 с.

Формулы для определения основных величин в стационарной задаче о плавлении образца внутренним источником теплоты

Formulas for determining the basic values in the stationary problem of melting a sample by an internal heat source

Симметрия	Плоская (n = 0)	Цилиндрическая (n = 1)	Сферическая (n = 2)
Граница раздела фаз, $\xi_m$	$1 + \Delta + \frac{1}{Bi} - \frac{1}{Ki}$	$(1 + \Delta) \exp \left[ -\frac{1}{Ki} + \frac{1}{Bi(1 + \Delta)} \right]$	$\frac{1}{\frac{1}{Ki} + \frac{1}{1 + \Delta} \left[ 1 - \frac{1}{Bi(1 + \Delta)} \right]}$
Первое критическое число Кирпичева, $Ki^*$	$\frac{1}{\Delta + \frac{1}{Bi}}$	$\frac{1}{\ln(1 + \Delta) + \frac{1}{Bi(1 + \Delta)}}$	$\frac{1 + \Delta}{\Delta + \frac{1}{Bi(1 + \Delta)}}$
Второе критическое число Кирпичева, $Ki^{**}$	$Bi$	$Bi(1 + \Delta)$	$Bi(1 + \Delta)^2$

Коэффициент формы в уравнении (16) учитывает увеличение поверхности теплообмена с окружающей средой при увеличении толщины слоя теплоизоляции. Таким образом, второе критическое условие выражает равенство теплового потока от нагревателя и теплового потока в окружающую среду при температуре границы, равной единице (т.е. температуре плавления).

Полученные результаты можно представить в виде таблицы.

### НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА

Уравнение теплопроводности в обеих областях можно записать в виде:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\varphi(\xi)}{\xi^n} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \xi^n \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) + q(\xi). \quad (17)$$

Здесь  $q(\xi)$  – стоки теплоты, связанные с плавлением материала; коэффициент  $\varphi(\xi)$  – это ступенчатая функция:

$$\varphi(\xi) = \begin{cases} \gamma\kappa, & \xi < \xi_m \\ 1, & \xi > \xi_m \end{cases}. \quad (18)$$

Кроме отношения теплопроводностей  $\kappa$ , в нестационарной задаче появляется отношение объемных теплоемкостей фаз  $\gamma$ . Поскольку стационарные характеристики плавления не зависят от отношения теплопроводностей фаз (как было показано в предыдущем разделе), мы будем далее вместо двух параметров использовать только один – отношение температуропроводностей фаз  $\chi = \gamma\kappa$ . Отметим, что граничные условия при  $\xi = 1$  и при  $\xi = 1 + \Delta$  для уравнения (17) те же, что и в стационарном случае, но условия на межфазной границе меняются:

$$\frac{1}{St} \frac{d\xi_m}{d\tau} = -\kappa \frac{\partial \theta}{\partial \xi}(\xi_m^-) + \frac{\partial \theta}{\partial \xi}(\xi_m^+). \quad (19)$$

Здесь  $St$  – число Стефана:

$$St = \frac{c(T_m - T_{env})}{L}, \quad (20)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость;  $L$  – тепловой эффект фазового перехода.

Приближенное решение нестационарной задачи с нагревателем внутри образца было получено в работе [21] в квазистационарной постановке (для малых  $St$ ). Мы рассматриваем модель, позволяющую определить время расплавления без ограничений на значения теплофизических параметров.

Для решения нестационарной задачи Стефана используется численный алгоритм, подробно описанный в работе [23]: уравнение теплопроводности (17) преобразуется в систему разностных уравнений на равномерной сетке; для описания фазового состояния материала используется вспомогательная функция  $X(\xi)$ , равная единице для твердой фазы и равная нулю для жидкой фазы. Тогда коэффициент  $\varphi$  является линейной функцией фазового состояния:

$$\varphi(\xi) = (1 - \chi)X(\xi) + \chi. \quad (21)$$

Пересчет значений вспомогательной функции  $X$  проводится согласно обычной энтропийной схеме:

$$\frac{\partial X^2(\xi)}{\partial \tau} = \begin{cases} 0, & \theta < 1 \\ -2StX(\xi) \frac{\partial \theta}{\partial \tau}, & \theta \geq 1 \end{cases}. \quad (22)$$

Уравнение (17) решается неявным методом, уравнение (22) – явным. Для повышения устойчивости численного алгоритма используется расщепление по физическим процессам. Решение задачи теплопроводности и кинетики плавления проводится поочередно: на каждом временном шаге  $\Delta t$  сперва решается уравнение (17) с шагом  $\Delta t/2$ ; затем решается уравнение (20) на промежуточном температурном распределении, при этом производится корректировка температуры с учетом рассчитанных стоков  $q$ ; наконец, уравнение (17) снова решается с шагом  $\Delta t/2$ .

Система разностных уравнений выглядит следующим образом:

$$\theta_i^* - \theta_i^0 = \frac{\Delta \tau}{2} \left[ \varphi_{i-1,i} \frac{\xi_{i-1}}{\xi_i} \theta_{i-1}^* - \left( \varphi_{i-1,i} \frac{\xi_{i-1}}{\xi_i} + \varphi_{i,i+1} \right) \theta_i^* + \varphi_{i,i+1} \theta_{i+1}^* \right] \quad (23)$$

Здесь  $i$  – индекс расчетного элемента; коэффициенты  $\varphi$  определяются как средняя теплопроводность между соседними расчетными элементами; индекс 0 относится к предыдущему временному слою. Расплавление материала рассчитывается с помощью приближенного интегрирования (22):

$$X_i = \begin{cases} X_i^0, \theta_i \leq 1 \\ X_i^0 - St(\theta_i^* - 1), \theta_i^* > 1. \end{cases} \quad (24)$$

После этого температура корректируется с учетом затрат теплоты на плавление:

$$\theta_i - \theta_i^* = \frac{\Delta \tau}{2} \left[ \varphi_{i-1,i} \frac{\xi_{i-1}}{\xi_i} \theta_{i-1} - \left( \varphi_{i-1,i} \frac{\xi_{i-1}}{\xi_i} + \varphi_{i,i+1} \right) \theta_i + \varphi_{i,i+1} \theta_{i+1} \right] - \frac{X_i^0 - X_i}{St} \quad (25)$$

Исследования точности алгоритма проводились в работе [23]. Подобные алгоритмы использовались в задачах с одновременным протеканием нескольких фазовых переходов в работах [24, 25]. Использование энтальпийной схемы позволяет добиться устойчивости за счет консервативности: при решении уравнений (23) и (25) на полушагах используется неявный метод (при этом

состояние материала фиксировано); введение переменной состояния расчетного элемента приводит к тому, что разностные уравнения (24) также имеют ограниченное решение. Таким образом, полученная комбинация будет устойчивой даже на грубых сетках (однако сходимость численного решения будет иметь первый порядок по времени и пространству, как показано в [23]).

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим поведение цилиндрического образца при значениях параметров:  $\Delta = 1$ ,  $Bi = 10$ ,  $St = 10$ ,  $\chi = 0,5$ . Критические значения числа Кирпичева для этого набора параметров равны  $Ki^* = 1,346$  и  $Ki^{**} = 20$ .

Выход на стационарное состояние для  $Ki = 10$  показан на рис. 1: за время порядка 5 безразмерных единиц (чисел Фурье) линия раздела фаз достигает стационарного значения (около 1,9), при этом температура на границе с нагревателем возрастает до 14 ед., а средняя температура образца (полученная интегрированием по радиусу) составляет около 5,4 ед.

Результаты расчетов с меняющимся числом Кирпичева показаны на рис. 2. При превышении первого критического значения появляется фронт плавления вблизи поверхности нагрева; при превышении второго критического значения фронт плавления достигает внешней границы за конечное время. Зависимость времени начала плавления и времени полного расплавления от числа Кирпичева показано на рис. 2 б: после резкого падения зависимости выполаживаются, и влияние интенсивности нагрева ослабевает, т.е. при больших  $Ki$  процесс плавления лимитируется теплопроводностью материала (при этом, соответственно, растет температура в области контакта с нагревателем). Можно видеть, что численные расчеты согласуются со стационарным решением в пределе больших времен нагрева.

Влияние числа Стефана показано на рис. 3, а: если при больших  $St$  граница раздела фаз движется практически со скоростью изотермы  $\theta = 1$ , то при малых значениях (т.е. при больших величинах теплоты плавления) происходит постепенное замедление фронта. Зависимости на рис. 3 можно сопоставить с результатами работы [21]: зависимость по-

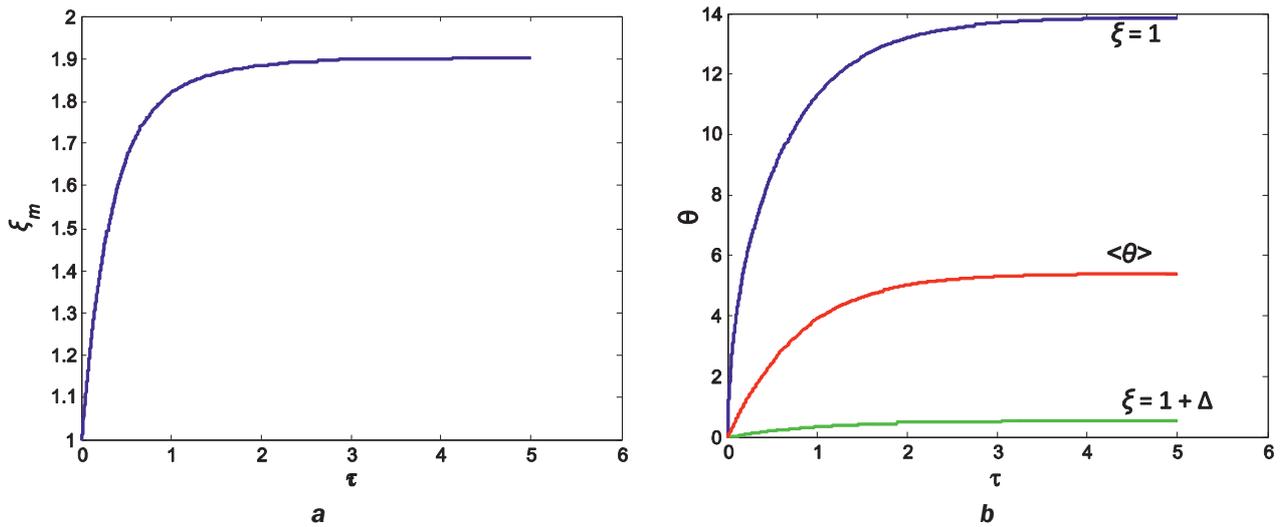


Рис. 1. Динамика движения фронта плавления (а) и температуры (b) в цилиндрическом образце при  $Ki = 10$   
 Fig. 1. Dynamics of melting front propagation (a) and temperature (b) in a cylindrical sample at  $Ki = 10$

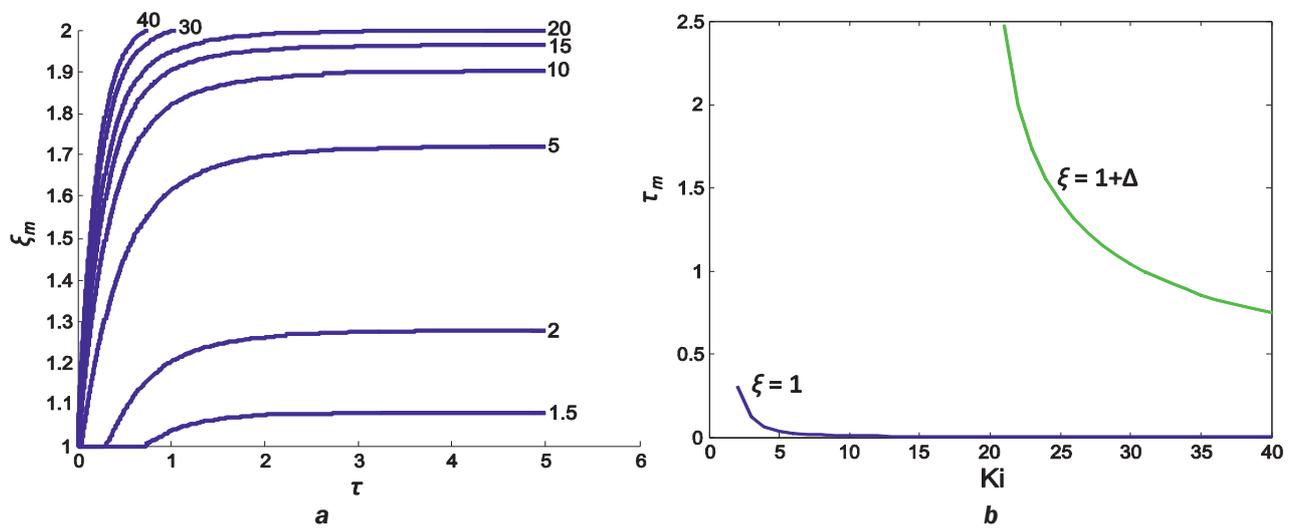


Рис. 2. Влияние числа Кирпичева (числа рядом с кривыми) на динамику границы раздела фаз (а) и время плавления (b)  
 Fig. 2. Influence of the Kirpichev number (numbers at the curves) on the phase boundary dynamics (a) and melting time (b)

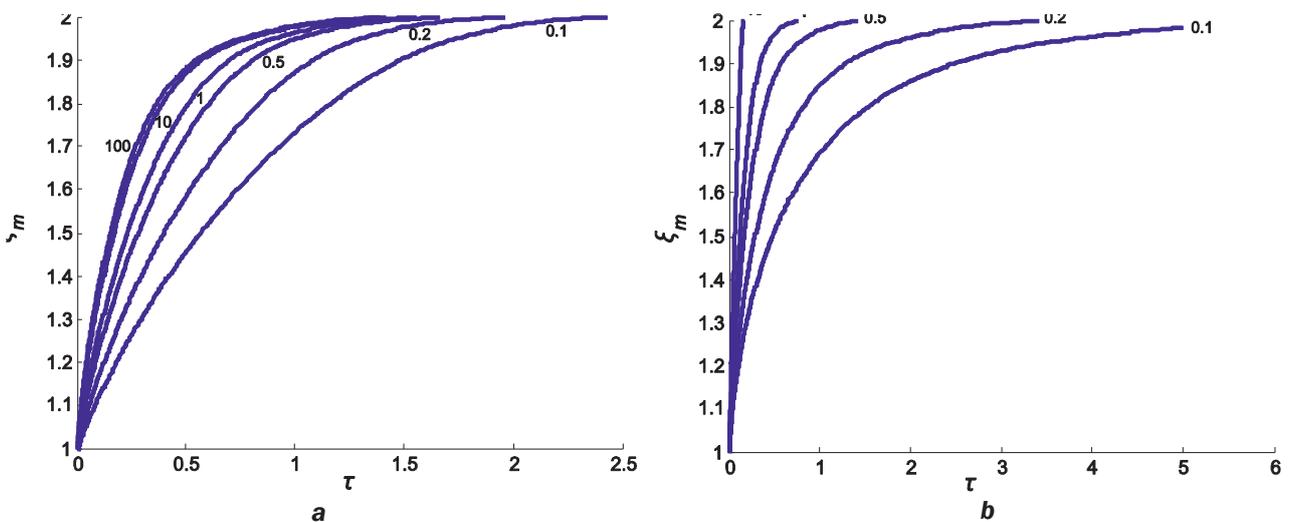


Рис. 3. Влияние числа Стефана (а) и отношения теплопроводностей фаз (b) на динамику границы раздела фаз ( $Ki = 25$ )  
 Fig. 3. Influence of the Stefan number (a) and thermal diffusivity ratio (b) on phase boundary dynamics ( $Ki = 25$ )

ложения границы раздела фаз от времени близка к линейной на начальном участке.

Еще более заметный эффект имеет параметр  $\chi$  (рис. 3 б): с ростом температуропроводности жидкой фазы происходит быстрое установление температуры в области расплава, что способствует ускорению расплавления (наблюдается движение границы раздела при практически постоянном граничном условии). Увеличение эффективной температуропроводности жидкости возможно, например, за счет естественной конвекции [12].

Подобный эффект наблюдался при исследовании модели плавления образца с объемным тепловыделением [23].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена нестационарная задача о расплавлении цилиндрического образца локализованным источником энергии. Полученные при анализе стационарной задачи решения использованы для задания условий, при которых заведомо происходит расплавление образца. С помощью численной модели проведены расчеты с варьированием теплофизических свойств материала образца и интенсивности теплоподвода. Проанализированы расчетные зависимости динамических характеристик процесса плавления от параметров задачи. Установлено существенное влияние различия транспортных свойств разных фаз на кинетику плавления.

## Список источников

1. Mallick S., Gayen D. Thermal behaviour and thermal runaway propagation in lithium-ion battery systems – a critical review // *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 62. P. 106894. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106894>.
2. Rocha T.T.M., Trevizoli P.V., De Oliveira R.N. A timeline of the phase-change problem for latent thermal energy storage systems: a review of theoretical approaches from the 1970-s to 2022 // *Solar Energy*. 2023. Vol. 250. P. 248–284. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.035>.
3. Nakamura Y., Yoshimura N., Ito H., Azumaya K., Fujita O. Flame spread over electric wire in sub-atmospheric pressure // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2009. Vol. 32. Iss. 2. P. 2559–2566. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.06.146>.
4. Kaliaperumal M., Dharanendrakumar M.S., Prasanna S., Abhishek K.V., Chidambaram R.K., Adams S., et al. Cause and mitigation of lithium-ion battery failure – a review // *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 19. P. 5676. <https://doi.org/10.3390/ma14195676>.
5. Мусакаев Н.Г., Бельских Д.С. Численное исследование процесса добычи газа из газогидратной залежи при наличии термического и депрессионного воздействия // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2023. Т. 9. № 3. С. 83–99. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-3-83-99>.
6. Tazetdinov B.I., Chiglintseva A.S., Gimaltdinov I.K., Kochanova E.Y. On the decomposition of gas hydrate at a positive temperature // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 919. P. 062057. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/6/062057>.
7. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное исследование влияния выгорания на характеристики зажигания полимера при локальном нагреве // *Физика горения и взрыва*. 2017. Т. 53. № 3. С. 59–70. <https://doi.org/10.15372/FGV20170208>.
8. Snegirev A., Kuznetsov E., Korobeinichev O., Shamkov A., Paletsky A., Shvartsberg V., et al. Fully coupled three-dimensional simulation of downward flame spread over combustible material // *Polymers*. 2022. Vol. 14. P. 4136. <https://doi.org/10.3390/polym14194136>.
9. Худяев С.И., Столин А.М., Маклаков С.В. Тепловой взрыв в условиях фазового превращения // *Физика горения и взрыва*. 1983. № 5. С. 85–91.
10. Прокофьев В.Г., Смоляков В.К. Нестационарные режимы горения бинарной безгазовой смеси при зажигании накаливаемой стенкой // *Физика горения и взрыва*. 2005. Т. 41. № 2. С. 45–50. EDN: NXUFDP.
11. Barrett J.W., Nurnberg R. Finite element approximation of a Stefan problem with degenerative Joule heating // *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis*. 2004. Vol. 38. No. 4. P. 633–652. <https://doi.org/10.1051/m2an:2004030>.
12. Crepeau J., Siahpush A.S. Solid–liquid phase change driven by internal heat generation // *Comptes Rendus Mecanique*. 2012. Vol. 340. Iss. 5. P. 471–476. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2012.03.004>.
13. Tang Jiannan, Huang Mei, Zhao Yuanyuan, Maqsood S., Ouyang Xiaoping. Numerical investigations on the melting process of the nuclear fuel rod in RIAs and LOCAs // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 124. P. 990–1002. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.001>.
14. Tanoue K., Nagao M., Yoshida A., Nishimura T. Heat transfer and phase change in a polystyrene packed bed during melting // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 79. P. 324–331. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.019>.
15. Hao Zhou, Mingxi Zhou, Pengnan Ma, Ming Cheng. Experimental investigation on the flame front resistance of gas channel growth with melt formation in iron ore sinter beds // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2019. Vol. 37. Iss. 4. P. 4607–4615. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.027>.

16. Donskoy I. Influence of heating conditions on formation and development of agglomerates in a reactive porous medium // *Heat Transfer Research*. 2022. Vol. 53. Iss. 12. P. 25–36. <https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.2022038756>.
17. Sajjadi M., Azaiez J. Heat and mass transfer in melting porous media: stable miscible displacements // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 88. P. 926–944. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.017>.
18. Jourabian M., Darzi A.A.R., Toghraie D., Akbari O.A. Melting process in porous media around two hot cylinders: numerical study using the lattice Boltzmann method // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2018. Vol. 509. P. 316–335. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.06.011>.
19. Darzi A.A.R., Farhadi M., Sedighi K. Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus // *Applied Mathematical Modelling*. 2012. Vol. 36. Iss. 9. P. 4080–4086. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.11.033>.
20. Azad M., Groulx D., Donaldson A. Melting of phase change materials in horizontal annuli // *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 42. P. 103096. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103096>.
21. Kothari R., Sahu S.K., Kundawal S.I. Comprehensive analysis of melting and solidification of a phase change material in an annulus // *Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 55. P. 769–790. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2453-9>.
22. Alsulami R.A., Zope T.M., Premnath K., Aljaghtham M. Convectively cooled solidification in phase change materials in different configurations subject to internal heat generation: quasi-steady analysis // *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 221. P. 119849. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119849>.
23. Donskoy I.G. Stefan problem for a heat-generating cylindrical sample with boundary conditions of the third kind: calculation of melting time // *iPolytech Journal*. 2024. T. 28. № 2. C. 290–302. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-290-302>.
24. Misyura S., Morozov V., Donskoy I., Shlegel N., Dorokhov V. Combustion of liquid fuels in the presence of CO<sub>2</sub> hydrate powder // *Fire*. 2023. Vol. 6. Iss. 8. P. 318. <https://doi.org/10.3390/fire6080318>.
25. Donskoy I.G. Dissociation of gas hydrates in a combustion environment // *Energy Systems Research*. 2024. Vol. 7. No. 1. P. 5–16. <https://doi.org/10.25729/esr.2024.01.0001>.

### References

1. Mallick S., Gayen D. Thermal behaviour and thermal runaway propagation in lithium-ion battery systems – a critical review. *Journal of Energy Storage*. 2023;62:106894. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106894>.
2. Rocha T.T.M., Trevizoli P.V., De Oliveira R.N. A timeline of the phase-change problem for latent thermal energy storage systems: a review of theoretical approaches from the 1970-s to 2022. *Solar Energy*. 2023;250:248-284. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.035>.
3. Nakamura Y., Yoshimura N., Ito H., Azumaya K., Fujita O. Flame spread over electric wire in sub-atmospheric pressure. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2009;32(2):2559-2566. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.06.146>.
4. Kaliaperumal M., Dharanendrakumar M.S., Prasanna S., Abhishek K.V., Chidambaram R.K., Adams S., et al. Cause and mitigation of lithium-ion battery failure – a review. *Materials*. 2021;14(19):5676. <https://doi.org/10.3390/ma14195676>.
5. Musakaev N.G., Belskikh D.S. Numerical study of the gas production process from a gas hydrate deposit in the presence of thermal and depression effects. *Tyumen state university herald. Physical and mathematical modeling*. 2023;9(3):83-99. (In Russ.). <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-3-83-99>.
6. Tazetdinov B.I., Chiglintseva A.S., Gimaltdinov I.K., Kochanova E.Y. On the decomposition of gas hydrate at a positive temperature. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;919:062057. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/6/062057>.
7. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Numerical study of the effect of burnout on the ignition characteristics of polymer under local heating. *combustion, explosion, and shock waves*. 2017;53(3):59-70. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/fgv20170208>.
8. Snegirev A., Kuznetsov E., Korobeinichev O., Shamkov A., Paletsky A., Shvartsberg V., et al. Fully coupled three-dimensional simulation of downward flame spread over combustible material. *Polymers*. 2022;14:4136. <https://doi.org/10.3390/polym14194136>.
9. Khudyaev S.I., Stolin A.M., Maklakov S.V. Thermal explosion under phase transformation conditions. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 1983;5:85-91. (In Russ.).
10. Prokofiev V.G., Smolyakov V.K. Unsteady combustion of a binary gasless mixture ignited by a hot wall. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2005;41(2):45-50. (In Russ.). EDN: NXUFDP.
11. Barrett J.W., Nurnberg R. Finite element approximation of a Stefan problem with degenerative Joule heating. *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis*. 2004;38(4):633-652. <https://doi.org/10.1051/m2an:2004030>.
12. Crepeau J., Siahpush A.S. Solid–liquid phase change driven by internal heat generation. *Comptes Rendus Mecanique*. 2012;340(5):471-476. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2012.03.004>.
13. Tang Jiannan, Huang Mei, Zhao Yuanyuan, Maqsood S., Ouyang Xiaoping. Numerical investigations on the melting process of the nuclear fuel rod in RIAs and LOCAs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018;124:990-1002. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.001>.

14. Tanoue K., Nagao M., Yoshida A., Nishimura T. Heat transfer and phase change in a polystyrene packed bed during melting. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014;79:324-331. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.019>.
15. Hao Zhou, Mingxi Zhou, Pengnan Ma, Ming Cheng. Experimental investigation on the flame front resistance of gas channel growth with melt formation in iron ore sinter beds. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2019;37(4):4607-4615. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.027>.
16. Donskoy I. Influence of heating conditions on formation and development of agglomerates in a reactive porous medium. *Heat Transfer Research*. 2022;53(12):25-36. <https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.2022038756>.
17. Sajjadi M., Azaiez J. Heat and mass transfer in melting porous media: stable miscible displacements. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015;88:926-944. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.017>.
18. Jourabian M., Darzi A.A.R., Toghraie D., Akbari O.A. Melting process in porous media around two hot cylinders: numerical study using the lattice Boltzmann method. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2018;509:316-335. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.06.011>.
19. Darzi A.A.R., Farhadi M., Sedighi K. Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus. *Applied Mathematical Modelling*. 2012;36(9):4080-4086. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.11.033>.
20. Azad M., Groulx D., Donaldson A. Melting of phase change materials in horizontal annuli. *Journal of Energy Storage*. 2021;42:103096. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103096>.
21. Kothari R., Sahu S.K., Kundawal S.I. Comprehensive analysis of melting and solidification of a phase change material in an annulus. *Heat and Mass Transfer*. 2019;55:769-790. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2453-9>.
22. Alsulami R.A., Zope T.M., Premnath K., Aljaghtam M. Convectively cooled solidification in phase change materials in different configurations subject to internal heat generation: quasi-steady analysis. *Applied Thermal Engineering*. 2023;221:119849. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119849>.
23. Donskoy I.G. Stefan problem for a heat-generating cylindrical sample with boundary conditions of the third kind: calculation of melting time. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):290-302. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-290-302>. EDN: HYUOIW.
24. Misyura S., Morozov V., Donskoy I., Shlegel N., Dorokhov V. Combustion of liquid fuels in the presence of CO<sub>2</sub> hydrate powder. *Fire*. 2023;6(8):318. <https://doi.org/10.3390/fire6080318>.
25. Donskoy I.G. Dissociation of gas hydrates in a combustion environment. *Energy Systems Research*. 2024;7(1): 5-16. <https://doi.org/10.25729/esr.2024.01.0001>.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ****Донской Игорь Геннадьевич,**

Д.Т.Н.,  
ведущий научный сотрудник  
лаборатории термодинамики,  
Институт систем энергетики  
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия  
✉ [donskoy.chem@mail.ru](mailto:donskoy.chem@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-2309-8461>

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR****Igor G. Donskoy,**

Dr. Sci. (Eng.),  
Leading Researcher of the Thermodynamics  
Laboratory,  
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,  
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia  
✉ [donskoy.chem@mail.ru](mailto:donskoy.chem@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-2309-8461>

**Заявленный вклад автора**

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

**Author contribution**

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

**Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The author declares no conflict of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 10.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 30.10.2024 г.; принята к публикации 20.11.2024 г.

**Information about the article**

The article was submitted 10.10.2024; approved after reviewing 30.10.2024; accepted for publication 20.11.2024.

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 67

EDN: DCFCUF

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-573-582



## Экологизированное использование ресурсов сернистых углей Иркутского бассейна как фактор эволюции теплоэнергетики региона

В.Ю. Рогов<sup>1</sup>✉<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель – определить возможные направления развития теплотехнологических систем Иркутской области, учитывая вовлечение ресурсов Иркутского угольного бассейна с высоким содержанием серы. В работе был использован системный анализ тенденций развития угольных энергетических котлов большой мощности с учетом возможности сокращения вредных выбросов (NO<sub>x</sub>, CO, SO<sub>x</sub>) преимущественно за счет рациональных конструкторских решений и использования водоугольного топлива. Показано, что вихревые процессы, реализуемые в схемах сгорания топлива, примененные на ТЭЦ Иркутской энергосистемы, позволяют повысить эколого-экономическую эффективность теплотехнических систем, главным образом за счет снижения температуры сгорания и увеличения времени нахождения в топке. Имеется опыт применения схемы низкотемпературного вихревого сжигания на Усть-Илимской ТЭЦ (котел № 6) и кольцевой топки на Ново-Иркутской ТЭЦ (котел № 8). Предложено провести реконструкцию имеющихся энергетических котлов по схеме низкотемпературного (при максимальной температуре в топке не более 1000–1100 °С) вихревого сжигания с дальнейшим использованием частично деминерализованного и десульфурованного водоугольного топлива, получаемого в месте добычи и транспортируемого по пульпопроводу. Топливо может быть сожжено в двухступенчатой топке, оно воспламеняется в ее нижней части, где размещается низкотемпературный кипящий слой инертного материала, а на второй ступени его дожигают в верхней части топки при температуре 1000–1200 °С. Таким образом, эволюция технических систем в теплоэнергетике Иркутской области в условиях роста объемов использования высокосернистого угля приводит к переводу его обогащения в контур деятельности энергетических предприятий. Основным направлением снижения выбросов сернистых соединений является сжигание топлива в низкотемпературном режиме с использованием десульфурованного водоугольного топлива.

**Ключевые слова:** тепловая энергетика, Иркутский угольный бассейн, высокосернистый уголь, низкотемпературное сжигание, вихревая топка, кипящий слой, водоугольное топливо

**Благодарности.** Автор благодарит рецензента Виктора Александровича Бочкарева за ценные советы при написании статьи.

**Для цитирования:** Рогов В.Ю. Экологизированное использование ресурсов сернистых углей Иркутского бассейна как фактор эволюции теплоэнергетики региона // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 573–582. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-573-582>. EDN: DCFCUF.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Ecologically sound use of sulfur-containing coal resources of the Irkutsk basin as a factor in the evolution of the regional thermal power industry

Viktor Yu. Rogov<sup>1</sup>✉<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The article aims to identify possible directions for developing heat technology systems in Irkutsk Oblast, taking into account the integration of resources of the Irkutsk coal basin with high sulfur content. The study applied a systems analysis of trends in the development of high-capacity coal-fired power boilers, considering the possibility of reducing harmful emissions (NO<sub>x</sub>, CO, SO<sub>x</sub>) primarily through rational design solutions and the use of coal-water slurry. It is shown that swirl processes realized in fuel combustion schemes that are applied at the TPPs

of the Irkutsk power system help to improve the ecological and economic efficiency of heat technology systems, primarily by reducing the combustion temperature and increasing the residence time in the furnace. Experience is available in applying the low-temperature swirl combustion scheme at Ust-Ilimskaya TPP (boiler 6) and a circular furnace at Novo-Irkutskaya TPP (boiler No. 8). It is proposed to redesign the existing power boilers according to the scheme of low-temperature swirl combustion (i.e., the maximum temperature in the furnace is no higher than 1000–1100°C), with the subsequent use of partially demineralized and desulphurized coal-water slurry obtained at the place of extraction and transported by slurry pipeline. Fuel can be burned in a two-stage furnace: it is ignited in its lower part where the low-temperature fluidized bed of inert material is located; then, it is burned completely in the upper part of the furnace at a temperature of 1000–1200°C. Thus, in the context of the growing use of high-sulfur coal, the evolution of technological systems in the thermal power industry of Irkutsk Oblast places its cleaning within the scope of activities of power companies. The main method of reducing the emissions of sulfur compounds consists in the low-temperature combustion of fuel using desulfurized coal water slurry.

**Keywords:** thermal power engineering, Irkutsk coal basin, high-sulfur coal, low-temperature combustion, vortex furnace, fluidized bed, water-coal fuel

**Acknowledgement.** The author would like to acknowledge the reviewer Viktor Aleksandrovich Bochkarev for giving valuable advice and comments.

**For citation:** Rogov V.Yu. Ecologically sound use of sulfur-containing coal resources of the Irkutsk basin as a factor in the evolution of the regional thermal power industry. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):573-582. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-573-582>. EDN: DCFCUF.

## ВВЕДЕНИЕ

Перспективное развитие энергетики Иркутской области связано преимущественно с увеличением производства электроэнергии на тепловых электростанциях, поскольку потенциал гидроэнергии для строительства новых крупных гидроэлектростанций во многом исчерпан. Использование природного газа Сибирской платформы связано преимущественно с экспортными поставками и развитием газохимических производств, поэтому добываемый в регионе природный газ не рассматривается как конкурирующий ресурс углю, запасы которого как топлива на порядки превосходят запасы газа. В то же время современные требования к строительству угольных тепловых электрических станций (ТЭС) (например, в Китае) таковы, что их экологические параметры должны быть не ниже, чем при использовании природного газа [1].

Современный объем потребления угля на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) Иркутской области составляет 10,86 млн т при объеме добычи в регионе 8,51 млн т [2]. В топливном балансе преобладают угли месторождений, расположенных в Тулунском районе: Мугунского – 28,6% (содержание серы 0,6–4%) и Азейского – 9,84% (содержание серы 0,5–1,9%). Доля привозного ирбейского угля (Канско-Ачинский бассейн) составляет 19,6% (содержание серы – 0,5%). Балансовые запасы намеченного к освоению Ишидейского месторождения (также Тулунский район) составляют

848,6 млн т (содержание серы – 0,5–1,8%). Каменные угли крупнейшего месторождения Каранцайского (Куйтунский район) являются высокосернистыми. Балансовые запасы угля здесь составляют по категориям А+В+С<sub>1</sub> 3080 млн т и категории С<sub>2</sub> – 3032 млн т. Содержание серы в западной зоне составляют 0,5–4,6%, в восточной – 0,8–7,5%. Запасы Новометелкинского каменноугольного месторождения (Заларинский район) составляют 733 млн т (содержание серы – 1,1–7%). Приемлемой с экологической точки зрения считается содержание серы в угле не выше 1% (например, для углей Канско-Ачинского бассейна, согласно ГОСТ Р 57021–2016<sup>2</sup>). Та же норма определена и для углей Восточной Сибири (ГОСТ 32352–2013<sup>3</sup>), за исключением углей Мугунского месторождения – не выше 4% и Азейского – не выше 3%. Очевиден корпоративный приоритет обеспечения рентабельного объема добычи перед экологическими параметрами.

Предположительно, образование серы в углях центральной части Иркутского бассейна связано с сероводородными водами, образовавшимися в загипсованной и битуминозной осадочной толще нижнего кембрия при участии сульфат-редуцирующих бактерий. Проникновение сероводородных вод в угленосную толщу происходило по тектоническим трещинам и ослабленным трещиноватым зонам [3]. Возможно, поэтому с ростом глубины залегания содержание серы в углях возраста-

<sup>2</sup>ГОСТ Р 57021–2016. Угли Канско-Ачинского бассейна для энергетических целей. М.: Стандартинформ, 2016.

<sup>3</sup>ГОСТ 32352–2013. Угли Восточной Сибири для энергетических целей. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015.

ет [4]. В малосернистых углях (при содержании общей серы 1,1–2,5%) преобладает органическая форма серы (65–84% от общей серы), практически неизвлекаемая при механических методах обогащения. В высокосернистых углях возрастает доля пиритной серы.

Проектным топливом для ТЭЦ Братско-Усть-Илимского территориально-производственного комплекса на севере Иркутской области является малосернистый уголь Ирша-Бородинского месторождения (Канско-Ачинский бассейн, Красноярский край), а также уголь Азейского бурогоугольного месторождения (Иркутский бассейн). К настоящему времени эти угли в значительной мере вытеснили уголь Ирбейского разреза (Канско-Ачинский бассейн). В то же время проведены испытания по замене привозных бурых углей каменным углем Жеронского месторождения, расположенного в 40 км севернее г. Усть-Илимск, с содержанием серы  $S_d = 0,56–0,77\%$  [5]. В качестве проектного топлива на ТЭЦ Иркутско-Черемховского промышленного узла предусмотрено использование угля Азейского и Ирша-Бородинского месторождений. В связи с сокращением объемов добычи, в настоящее время вместо проектного азейского угля используется уголь Мугунского месторождения с более высоким средним содержанием серы (0,9 против 0,5%) [6]. Отметим, что содержание серы на сухую массу в мугунском угле за период с 2006 г. по 2014 г. возросло с 1,2 до 2,2% [6]. Данные о содержании серы и запасах угля месторождений Иркутского бассейна приведены в таблице.

Согласно Федеральному закону № 19-ФЗ от 2014 г., кроме обеспечения норматива ка-

чества окружающей среды, а именно средне-суточной предельно-допустимой концентрации (ПДК<sub>с.с.</sub>) на уровне дыхания, предприятия должны выполнять и технологические нормативы выбросов. Технологический норматив – это норматив допустимых выбросов в расчете на единицу выпускаемой продукции. Разработанным информационно-техническим справочником (ИТС) по наилучшим доступным технологиям сжигания топлива<sup>4</sup> на крупных установках в целях производства энергии установлено, что допустимые значения концентраций оксидов серы для котельных установок мощностью более 400 т/ч, введенных в эксплуатацию до 31.12.2000 г., массовая концентрация  $SO_2$  в дымовых газах<sup>4</sup> при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,4$  не должна превышать 3000 мг/м<sup>3</sup>. Учитывая реальные коррозионные процессы в котлоагрегатах Ново-Иркутской ТЭЦ и других электростанциях Иркутской энергосистемы, примем данный норматив как основание для перспективной реконструкции указанного оборудования. Замеренная концентрация  $SO_2$  сернистых соединений за дымососом одного из котлов Ново-Иркутской ТЭЦ при содержании серы в угле 2,5% составляет около 1350 ppm [6], что соответствует 3630 мг/м<sup>3</sup>. В последние годы на ТЭЦ Иркутской энергосистемы проводится масштабная реконструкция котлоагрегатов, что позволяет рассматривать это оборудование как вновь введенное. В соответствии с требованиями технологических нормативов для котельного оборудования (с указанной мощностью), введенного после 1 января 2001 г., концентрация  $SO_x$  в дымовых газах<sup>5</sup> не должна превышать 700 мг/м<sup>3</sup>.

Запасы и сернистость углей крупнейших месторождений Иркутского бассейна  
 Reserves and sulfur content of coals from the largest Irkutsk basin deposits

Месторождение, состояние использования	Запасы кат. А+В+С <sub>1</sub> , млн т	Запасы С <sub>2</sub> , млн т	Забалансовые запасы, млн т	Содержание серы, %
Азейское (используется)	369,0	25,2	20,8	0,5–1,9
Вознесенское (не используется)	515,1	13,2	109,9	0,5–2,14
Головинское (используется)	561	2121,7	356	0,4–1,5
Ишидейское (намечено для эксплуатации)	831	17,6	259,4	0,5–1,8
Каранцайское (не используется)	3080	3032	7602,9	0,6–6 и выше
Ишинское (используется)	16,5	507,2	95	0,3–0,7
Мугунское (используется)	1725,3	433	747	0,5–4
Новометелкинское (не используется)	662,8	13,6	657,2	1,1–7

<sup>4</sup>ИТС 38-2017. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. М.: Бюро НДТ, 2017. 271 с.

<sup>5</sup>ГОСТ Р 50831-95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. М.: Госстандарт России, 1996. 24 с.

В Иркутске основным источником выбросов соединений серы в атмосферу являются предприятия теплоэнергетики, на них приходится 89% выбросов. Проведенные расчеты с использованием математической модели, основанной на аналитическом решении уравнения переноса и турбулентной диффузии примеси, показывают максимальную частоту превышения ПДК<sub>с.с.</sub> – в декабре 714 ч, в июле – 598 ч (из 720 ч в месяце) [7].

Основной объем добычи и использования угля в ближайшие 10–15 лет будет приходиться на Мугунское месторождение, содержание серы в угле которого колеблется от 0,5 до 4%. Принятый руководством АО «Востсибуголь» подход к усреднению содержания серы в товарном угле<sup>6</sup> представляется ненадежным. Балансовые запасы категорий А+В+С1 Ишидейского месторождения составляют 0,85 млрд т, содержание золы – 17–20%, серы – 0,5–1,8%. Для строительства электростанции предполагается создание нового угольного разреза мощностью 12 млн т/год [2].

Угли крупнейшего Каранцайского месторождения имеют содержание серы 0,6–6% и выше. Ввиду того, что сера в иркутских углях находится преимущественно в органической форме, основным способом подавления сернистых выбросов является применение топок с низкой температурой сжигания и применение серопоглощающих добавок (известняка, доломитов, магнезитов).

Важнейшим условием снижения уровня образования сернистых газов в топке энергетического котла является обеспечение температуры горения топлива не выше 1100 °С. Сернистые соединения, поглощенные оксидами щелочных металлов, входящими в состав минеральной части углей либо введенные в топку в качестве поглотителей сернистых газов при повышенных температурах, разлагаются. Сульфат кальция разлагается при температуре 1200 °С, сульфат магния – при температуре 1137 °С. Показано также, что введение известняка (CaCO<sub>3</sub>) и магнезита (MgCO<sub>3</sub>) в качестве серопоглощающего реагента в составе водоугольного топлива эффективно до температуры 1100 °С,

при дальнейшем повышении температуры в продуктах горения появляется SO<sub>2</sub> [8].

### СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ В ИРКУТСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

К настоящему времени реализованы проекты реконструкции некоторых ТЭЦ в Иркутской энергосистеме, позволяющие снизить выбросы вредных веществ, включая сернистые соединения:

– низкотемпературное вихревое сжигание;

– кольцевая вихревая топка.

В 2006 г. на Усть-Илимской ТЭЦ введен в опытно-промышленную эксплуатацию котлоагрегат БКЗ-420-140-9 ст. № 6 с вихревой топкой, который является головным образцом, реализующим сжигание немолотого (мелкодробленного) угля в топке с низкотемпературным вихревым факелом по схеме Ленинградского политехнического института [9]. Вихревая топка встраивается в существующий топочный объем котла без дорогостоящей переделки или замены большей части топочных экранов, которая требуется при реконструкциях по другим схемам. Организация вихревого движения удлиняет время нахождения топлива в котле, что предполагает также применение немолотого угля взамен угольной пыли и снижение температуры горения [9]. Поэтому, очевидно, в вихревых топках в качестве меры по снижению сернистых выбросов совместное сжигание канско-ачинских и местных углей будет более эффективным.

В качестве примера высокой экологической эффективности применения вихревого метода можно привести реконструкцию котла БКЗ-220-100 на Новомосковской ГРЭС с переводом сжигания высокосернистых подмосковных бурых углей на низкотемпературное вихревое (НТВ), при котором максимальная температура в топке не превышает 1000–1100 °С; степень связывания оксидов серы в котле только за счет основных окислов собственной золы топлива составила 40–45% [10]. Расчетная (теоретическая) температура горения топлива для котлов

<sup>6</sup>Для стабилизации содержания серы Востсибуголь приобрел новый участок недр в Иркутской области за 45 млн руб. Режим доступа: <https://neftegaz.ru/news/coal/200080-dlya-stabilizatsii-soderzhaniya-sery-vostsibugol-priobrel-novyy-uchastok-neдрv-irkutskoy-oblasti-za/> (дата обращения: 20.02.2024).

БКЗ-420-149 Ново-Иркутской ТЭЦ составляет 1884 °С [3]; однако при испытании котла БКЗ-420-140 в 2022 г. при нагрузке котла 360 т/ч была зарегистрирована температура 1350 °С. Предполагается, что в ближайшей перспективе (15–20 лет), до момента массового вывода котлов из эксплуатации, перевод на НТВ-схемы в процессе их капитального ремонта может оказаться основным методом повышения их экологической и экономической эффективности.

Проведенные опыты по совместному сжиганию углей Канско-Ачинского бассейна (месторождение Латынцевское, разрез Ирбейский) и Мугунского месторождения показали, что для эффективного связывания диоксидов серы из дымовых газов необходимо, чтобы содержание щелочных металлов в золе находилось в диапазоне 20–25% (при зольности ирбейского угля во время испытаний, равной 14,66–15,56%, содержание Са, Na, Mg в золе находилось в диапазоне 5–10%) [4]. Фактически требуется введение дополнительных серопоглощающих агентов, что неудивительно, поскольку температура сжигания углей превышает указанные (рекомендованные) 1000 °С.

В качестве серопоглощающего агента при сжигании углей Иркутского бассейна предлагается использовать ресурсы магнезитов Онотского месторождения, которые составляют 198,43 млн т по категориям В+С1 и 11,19 млн т по категории С2.

Другим направлением низкотемпературного сжигания угля является применение кольцевых топков. На Ново-Иркутской ТЭЦ в 2003 г. в промышленную эксплуатацию введен котел № 8 марки Е-820-140-1С производительностью 820 т пара в час и давлением 13,8 МПа с температурой пара на выходе 560 °С. Кольцевые топочные устройства, в сущности, являются развитием широко распространенных в энергетике тангенциальных топков, и поэтому при их расчете и проектировании используются рекомендации для тангенциальных топков с некоторыми уточнениями. Сравнительно низкий температурный уровень в зоне горения (ниже 1200 °С) и высокая интенсивность смесеобразования при вихревом движении газов в кольцевой топке обе-

спечивают относительно низкие концентрации<sup>7</sup> вредных выбросов NO<sub>x</sub> – 370,4 мг/нм<sup>3</sup> и СО – 20,70 мг/нм<sup>3</sup>. Капитальные вложения на строительство кольцевого котла на 8–10% меньше вложений на строительство П-образных котлов аналогичной паропроизводительности. Наряду с созданием новых энергоблоков котлы с кольцевой топкой, в связи с их меньшими габаритами, могут быть применены при замене отработавших блоков с установкой в существующую ячейку станции с сохранением или даже увеличением мощности нового блока.

К сожалению, исследования по проблеме снижения выбросов сернистых загрязнений при использовании кольцевых топков не проводились, хотя само по себе снижение температуры горения угольного топлива (до 1200 °С) не способствует снижению интенсивности процессов разложения соединений щелочных металлов и серы. Предполагается, что, как и в случае с низкотемпературной вихревой топкой, возможно достижение температуры горения, позволяющей образовывать и сохранить связанные сульфаты щелочных металлов, в том числе за счет сорбентов.

Большинство котлоагрегатов в Иркутской энергосистеме имеет сверхнормативный срок службы (свыше 35 лет). Поэтому вопрос о технологической парадигме в процессе реконструкции угольной теплоэнергетики региона становится неизбежным.

На сегодняшний день наиболее эффективной с эколого-экономической позиции является технология сжигания угля в низкотемпературных котлах с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) [1]. Температура сжигания топлива в таких котлах составляет 800–900 °С. Отметим, что в Болгарии и Румынии устаревшие котлы марки БКЗ заменены на современные с циркулирующим кипящим слоем [11]. Как и в котлах с использованием НТВ-схемы, снижение температуры сгорания позволяет также снизить выбросы соединений NO<sub>x</sub>. Представляется, что сжигание углей в котлах с ЦКС без предварительной десульфурации угля допустимо при содержании серы в угле 1,0–1,5%, поскольку связывание серы в углях с большим содержанием серы неэффективно из-за того, что сульфат

<sup>7</sup>Серант Ф.А. Разработка и исследование кольцевой топки, ее промышленное внедрение и испытания на котле паропроизводительностью 820 т/ч: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.14. Новосибирск, 1999. 58 с. EDN: ZLIDGV.

кальция в форме расплава образует корку на поверхности оксида кальция, что резко снижает дальнейшее прохождение реакции. Поэтому обеспечить использование CaO при оптимальной температуре в топке 850 °С вряд ли возможно более чем на 40% его содержания в известняке [1].

### **ПАРАДИГМА ПЕРЕХОДА НА ДЕСУЛЬФУРИРОВАННОЕ ВОДОУГОЛЬНОЕ ТОПЛИВО**

Вовлечение угля с более высоким содержанием серы (свыше 2%) обуславливает необходимость его переработки в водоугольное топливо, предусматривающей его десульфурацию и деминерализацию. Примером такой технологии может служить метод, разработанный в Институте импульсных процессов и технологий (Украина). В процессе электроразрядной десульфурации часть органической серы выгорает под воздействием высокой температуры плазмы, а часть серы, находящейся в пирите, оседает на дно электроразрядного дезинтегратора и удаляется в виде шлама при изготовлении водоугольной суспензии; содержание серы в угле может быть снижено примерно на 80% (например, с 3,5 до 0,5%). Расход электроэнергии на дезинтеграцию угля на фракции ниже 50 мкм при использовании электрогидравлического метода составляет 30 кВт·ч/т [12], что сопоставимо с затратами на подготовку пылеугольного топлива. В процессе электростатического воздействия на уголь и подготовке водоугольной суспензии, при отсутствии воздушного дутья, основная часть серы находится в виде сероводорода, методы очистки от которого освоены в газовой промышленности.

Другим примером технологии производства деминерализованного водно-угольного топлива является способ, при котором в рабочей камере применен сверхвысокочастотный (СВЧ) генератор для измельчения пористой органической части методом «внутривзрывного взрыва» под действием СВЧ электромагнитного поля до получения требуемого класса крупности [18]. Отметим, что электростатическими методами предложено измельчать уголь и в патенте RU2636740C1

[14]. Здесь также отмечается частичное испарение серы и углеводородных продуктов в процессе электро- и термоактивации мелкодисперсных частиц угля в суспензии электрическим разрядом. Были испытаны угли месторождений Республики Бурятия: Окино-Ключевского (среднее содержание серы – 0,87%), Тугнуйского (содержание серы – 0,32–0,5%) и Адуун-Чулунского (Монголия). В процессе электротермического воздействия зольность образцов угля упала с 29 до 18% из-за выделения окиси газов S, N и O.

Использование водоугольного топлива (ВУТ) в котлах с ЦКС позволяет обеспечить снижение избытка воздуха в топочном процессе, поскольку содержащаяся в ВУТ вода выполняет функцию промежуточного окислителя. Одной из особенностей горения ВУТ является более низкая температура воспламенения, которая ниже аналогичной температуры для обычного пылеугольного топлива. Температура слоя, при которой наблюдается минимальное количество выбросов диоксида серы, равняется 700–800 °С [15]. Примером решения проблемы сжигания ВУТ в топке кипящего слоя является полезная модель [16], согласно которой мелкие фракции угля (менее 10 мм), еще не загоревшись, «втягиваются» продольным перемешиванием внутрь слоя. На возможность сжигания кавитационного водоугольного топлива в топках с кипящим слоем показывает решение, при котором сжигание ВУТ в агрегате производится в две ступени: на первой ступени топливо воспламеняют в нижней части топки, где размещается низкотемпературный кипящий слой инертного материала при температуре 930–1000 °С и недостатке кислорода, а на второй ступени его дожигают в верхней части топки при температуре 1000–1200 °С с добавлением вторичного воздуха [17]. Для котлов, производительность которых от 700 т пара в час и выше, объемную часть топки целесообразно принять кольцевой, что позволит снизить высоту котла на 15–18%, его вес и стоимость почти на 30% по сравнению с котлами, оборудованными топками с ЦКС<sup>8</sup>. Таким образом, имеются технологические предпосылки для применения ВУТ топлива в топках с циркулирующим кипящим слоем, в

<sup>8</sup>Водоугольное топливо – технология будущего. Режим доступа: <https://www.rosteplo.ru/news/2007/06/06/1181067282-vodougolnoe-toplivo-tekhnologiya-budushchego> (дата обращения: 20.02.2024).

том числе в процессе осуществления реконструкции действующих котлов.

Имеются технологические предпосылки для сжигания ВУТ и в вихревой камере [18]. Однако довольно высокий механический недожог (5%), на наш взгляд, требует доработки предлагаемой схемы.

Дополнительными предпосылками использования ВУТ на ТЭЦ юга Иркутской области являются:

– возможность осуществлять процессы частичной десульфурации и деминерализации в местах добычи угля, оставляя минеральную часть для использования в качестве закладочной массы, снижая объем транспортируемого топлива и затраты на транспортировку с использованием пульпопроводов, а также затраты на хранение и утилизацию золошлаковых отходов в районах размещения ТЭЦ;

– возможность централизованного обеспечения водоугольным топливом ТЭЦ юга Иркутской области с использованием пульпопроводов от мест добычи (месторождения Мугунское, Ишидейское, Каранцайское и др.). Расстояние от центра добычи (г. Тулун) до Иркутска – около 400 км. При этом обеспечиваются поставки ВУТ во все ТЭЦ Иркутско-Черемховского промышленного узла, это города Зима, Усолье-Сибирское, Ангарск, Иркутск, Шелехов.

В Черемховском районе, где размещались углеобогащательные фабрики, накоплено около 100 млн т углесодержащих шламов с содержанием золы 30%, что позволяет их использовать даже на действующих котлах. Для

связывания сернистых соединений в процессе подготовки композиционного топлива из шламов применялись различные местные компоненты, что позволило снизить выбросы диоксидов серы на 18–30% в зависимости от доли гранулированных отходов углеобогащения в смеси, сжигаемой в опытном порядке на ТЭЦ-12 (г. Черемхово) [18–20]. Представляется перспективной возможность организации сжигания водоугольного топлива, приготавливаемого из указанных шламов (в том числе для наработки опыта его десульфурации) и реконструкции энергетических котлов.

Одним из преимуществ водоугольного топлива является перспективная возможность его сравнительно простой газификации с последующим сжиганием синтез-газа в высокоэффективных парогазовых установках. Синтез-газ очищается от вредных примесей, включая сероводород и сернистый газ известными способами, например, путем продувки через воду.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Использование высокосернистых углей Иркутского бассейна обуславливает реконструкцию действующих котлов по низкотемпературной вихревой схеме. В дальнейшем, по мере роста объемов потребления высокосернистого угля, целесообразно перейти на использование десульфурированного и частично деминерализованного водоугольного топлива. Предлагается строительство пульпопровода от мест добычи угля до центров его использования в Иркутско-Черемховском промышленном узле.

## **Список источников**

1. Рябов Г.А. Обзор результатов зарубежных и отечественных исследований в области использования технологии сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое // Теплоэнергетика. 2021. № 2. С. 41–60. <https://doi.org/10.1134/S0040363621020053>. EDN: AFKXUZ.
2. Такайшвили Л.Н., Агафонов Г.В. Перспективы использования энергетических углей Иркутской области // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 6. С. 1277–1284. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1271-1284>. EDN: NYGCQA.
3. Джумаян Н.Р., Наставкин А.В. Мацеральный и химический составы бурых углей Мугунского месторождения // Химия твердого топлива. 2019. № 4. С. 3–8. <https://doi.org/10.1134/S0023117719040054>. EDN: JPFVOC.
4. Коваль Т.В., Кудряшов А.Н. Оценка шлакующих и загрязняющих свойств углей, сжигаемых на тепловой электростанции ПАО «Иркутскэнерго» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 3. С. 639–648. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-639-648>. EDN: SXGWGD.
5. Кудряшов А.Н., Кулагин Н.В., Сеницкая А.В., Бибикина Ю.Д. Оценка возможности сжигания жеронского каменного угля на котлоагрегатах БКЗ-420-140 ПТ-2 Усть-Илимской ТЭЦ // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 2. С. 106–117. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-2-106-117>.
6. Бочкарев В.А., Перфильев А.О. Опытное сжигание смеси мугунского и ирбейского углей в котлоагрегате БКЗ-500-140 // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 11. С. 222–227. EDN: TALHYN.

7. Ахтиманкина А.В., Аргучинцева А.В. Загрязнение атмосферного воздуха промышленными предприятиями г. Иркутска // Известия Иркутского государственного университета. 2013. Т. 6. № 1. С. 3–19. EDN: QCKRLN.
8. Мурко В.И., Карпенко В.И., Сенчура Ю.А., Тайлаков О.В., Хмяляйнен В.А. Возможности снижения вредных выбросов при сжигании суспензионного угольного топлива в котлах различной мощности // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2016: сб. матер. XVI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Кемерово, 23–24 ноября 2016 г.). Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2016. С. 182. EDN: XGMXBJ.
9. Финкер Ф.З., Капица Д.В., Кубышкин И.Б. От вихревой топки ЛПИ до ВИР-сжигания // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Наука и образование. 2011. № 1. С. 309–317. EDN: NRERWV.
10. Тринченко А.А. Внедрение низкотемпературной вихревой технологии сжигания в энергетических котлах как способ повышения их экологических показателей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Наука и образование. 2014. № 4. С. 61–70. EDN: TFNUWZ.
11. Пузырёв Е.М., Саломатов В.В. Перспективы и возможность промышленного освоения ЦКС технологии сжигания топлива // Ползуновский вестник. 2019. № 1. С. 132–136. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2019.01.024>. EDN: YTXPDI.
12. Rizun A.R., Denisyuk T.D., Golen' Y.V., Kononov V.Y., Rachkov A.N. Electric discharge disintegration and coal desulphurization in the manufacture of water-coal fuel // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2011. Т. 47. № 1. С. 100–102. <https://doi.org/10.3103/S1068375511010170>. EDN: XKMKFT.
13. Пат. № 2266313, Российская Федерация, С10L 1/32. Способ приготовления деминерализованного водоугольного топлива / А.С. Кондратьев; заявитель и патентообладатель Государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение (НПО) «Гидротрубопровод». Заявл. 16.07.2004; опубл. 20.12.2005. Бюл. № 36.
14. Пат. № 2636740, Российская Федерация, С10L 1/00, С10L 1/32/25. Способ получения водоугольной суспензии и установка для его осуществления / С.Л. Буянтуев, А.Б. Хмелев, А.С. Кондратенко, Ю.Ю. Стебенькова; заявитель и патентообладатель Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления. Заявл. 29.12.2016; опубл. 28.11.2017. Бюл. № 34.
15. Каримов А.А. Особенности сжигания в кипящем слое водоугольного топлива из бурых углей Республики Узбекистан // Молодой ученый. 2017. № 9. С. 73–76. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/143/40239/> (дата обращения: 07.02.2024).
16. Пат. № 151389, Российская Федерация, U1 F23C 10/00. Устройство для ввода водоугольного топлива в топку с кипящим слоем / Т.Ф. Богатова, Б.В. Берг, А.Ф. Рыжков, В.А. Микула, Е.И. Левин, П.В. Осипов, И.А. Берг; заявитель и патентообладатель Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Заявл. 09.01.2014; опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.
17. Пат. № 2546351, Российская Федерация, C2 F23C 10/00. Способ сжигания кавитационного водоугольного топлива в топке кипящего слоя инертного материала, снижающий образование вредных выбросов оксидов азота и серы / Е.Г. Карпов, Ф.А. Серант, И.В. Листратов; заявитель и патентообладатель ЗАО «КОТЭС». Заявл. 19.07.2013; опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.
18. Мурко В.И., Федяев В.И., Прошунин Ю.Е., Почечуев А.А., Карпенко В.И., Хмяляйнен В.А. Результаты сжигания суспензионного водоугольного топлива в котле типа «Теплотрон» // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2018. № 11. С. 560–566. Режим доступа: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/71582>. (дата обращения: 07.02.2024).
19. Кудряшов А.Н., Коваль Т.В., Ижганайтис М.И. Опыт сжигания композиционного топлива на основе угольного шлама на ТЭЦ Иркутской области // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. № 1. С. 33–45. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-33-45>. EDN: KHVBHK.
20. Murko V.I., Fedyayev V.I., Karpenok V.I., Zasytkin I.M., Senchurova Y.A., Riesterer A. Investigation of the spraying mechanism and combustion of the suspended coal fuel // Thermal Science. 2015. Vol. 19. Iss. 1. P. 243–251. <https://doi.org/10.2298/TSCI120618095M>. EDN: UFOGCR.

### References

1. Ryabov G.A. A review of the research results into the technologies of solid-fuel combustion in a circulating fluidized bed conducted abroad and in Russia. *Thermal Engineering*. 2021;2:41-60. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363621020053>. EDN: AFKXUZ.
2. Takaishvili L.N., Agafonov G.V. Application prospects of Irkutsk region thermal coals. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1271-1284. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1271-1284>. EDN: HYGQQA.
3. Dzhumayan N.R., Nastavkin A.V. Maceral and chemical compositions of brown coals from the Mugunsk deposit. *Himiya tverdogo topliva*. 2019;4:3-8. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0023117719040054>. EDN: JPFVOC.
4. Koval T.V., Kudryashov A.N. Assessment of slagging and polluting properties of coals burned at the Irkutskenergo Cogeneration Plant, JSC. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(3):639-648. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-639-648>. EDN: SXGWGD.

5. Kudryashov A.N., Kulagin N.V., Sinitskaya A.V., Bibikova Yu.D. Assessing possibility of burning Zheronsky coal by Ust-Ilim CHP boiler units BKZ-420-14OPT-2. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(2):106-117. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-2-106-117>.
6. Bochkarev V.A., Perfiliev A.O. Experimental combustion of Mugunsky and Irbeisky coal mixture in BKZ-500-140 boiler plant. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;11:222-227. (In Russ.). EDN: TALHYN.
7. Akhtimankina A.V., Arguchintseva A.V. Air pollution caused by Irkutsk industrial enterprises. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences*. 2013;6(1):3-19. (In Russ.). EDN: QCKRLN.
8. Murko V.I., Karpenok V.I., Senchurova Yu.A., Tajlakov O.V., Hyamyalyajnen V.A. Possibility to reduce harmful emissions when combusting suspension coal fuel in various capacity boilers. In: *Prirodnye i intellektual'nye resursy Sibiri. Sibresurs 2016: sbornik materialov XVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Natural and Intellectual Resources of Siberia. Sibresurs 2016: Collected materilas of the 16<sup>th</sup> International Research and Practical Conference*. 23–24 November 2016, Kemerovo. Kemerovo: T.F. Gorbachev State Technical University; 2016, p. 182. (In Russ.). EDN: XGMXBJ.
9. Finker F.Z., Kapica D.V., Kubyshkin I.B. From LPI swirl-type furnace to VIR combustion. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2011;1:309-317. (In Russ.). EDN: NRERWV.
10. Trinchenko A.A. Adoption of low-temperature swirl combustion technology in power boilers as a way for improving their environmental specifications. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2014;4:61-70. (In Russ.). EDN: TFNUWZ.
11. Puzyryov E.M., Salomatov V.V. Development and industrial prospects of circulating fluidized bed fuel combustion technology. *Polzunovskiy vestnik*. 2019;1:132-136. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2019.01.024>. EDN: YTXPDI.
12. Rizun A.R., Denisyuk T.D., Golen' Y.V., Kononov V.Y., Rachkov A.N. Electric discharge disintegration and coal desulphurization in the manufacture of water-coal fuel. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011;47(1):100-102. <https://doi.org/10.3103/S1068375511010170>. EDN: XKMKFT.
13. Kondrat'ev A.S. *Method to prepare demineralized coal-water fuel*. Patent RF, no. 2266313; 2005. (In Russ.).
14. Buyantuev S.L., Khmelev A.B., Kondratenko A.S., Steben'kova Yu.Yu. *A method to produce coal-water slurry and an nstallation to implement it*. Patent RF, no. 2636740; 2017. (In Russ.).
15. Karimov A.A. Combustion features of coal-water fuel from Uzbekistan Republic brown coals in a fluidized bed. *Molodoj uchenyj*. 2017;9:73-76. Available from: <https://moluch.ru/archive/143/40239/> [Accessed 7th February 2023]. (In Russ.).
16. Bogatova T.F., Berg B.V., Ryzhkov A.F., Mikula V.A., Levin E.I., Osipov P.V., Berg I.A. Device for introducing coal-water fuel into a fluidized bed furnace. Patent RF, no. 151389; 2015. (In Russ.).
17. Karpov E.G., Serant F.A., Listratov I.V. Method of burning cavitation coal-water fuel in a fluidized bed furnace of inert material reducing nitrogen and sulfur oxide harmful emission formation. Patent RF, no. 2546351; 2015. (In Russ.).
18. Murko V.I., Fedyaev V.I., Proshunin Yu.E., Pochechuev A.A., Karpenok V.I., Hyamyalyajnen V.A. The combustion results of suspension water coal fuel in the "Teplotron" type boiler. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2018;11:560-566. Available from: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/71582> [Accessed 7th February 2024]. (In Russ.).
19. Кудряшов А.Н., Коваль Т.В., Ижганайтис М.И. Experience of combustion composite fuel at a thermal power station in the Irkutsk region. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;1:33-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-33-45>. EDN: KHWHBK.
20. Murko V.I., Fedyaev V.I., Karpenok V.I., Zasytkin I.M., Senchurova Y.A., Riesterer A. Investigation of the spraying mechanism and combustion of the suspended coal fuel. *Thermal Science*. 2015;19(1):243-251. <https://doi.org/10.2298/TSCI120618095M>. EDN: UFOGCR.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

##### **Рогов Виктор Юрьевич,**

д.э.н., доцент,  
профессор кафедры автоматизации и управления,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, Россия  
✉ [rogovvu@mail.ru](mailto:rogovvu@mail.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

##### **Viktor Yu. Rogov,**

Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor,  
Professor of the Department of Automation and Control,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
✉ [rogovvu@mail.ru](mailto:rogovvu@mail.ru)

#### Заявленный вклад автора

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

#### Author contribution

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

**Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 12.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 10.04.2024 г.; принята к публикации 08.05.2024 г.

**Conflict of interests**

The author declares no conflict of interests.

*The final manuscript has been read and approved by the author.*

**Information about the article**

The article was submitted 12.03.2024; approved after reviewing 10.04.2024; accepted for publication 08.05.2024.

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.311

EDN: SJXYRX

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-583-596



## Оценка влияния гидроаккумулирующей электростанции на нормальный режим работы электроэнергетической системы Монголии

Ш.Н. Сидиков<sup>1✉</sup>, А.Г. Русина<sup>2</sup>, Т. Осгонбаатар<sup>3</sup>, А.Ю. Арестова<sup>4</sup>, Б. Буренцагаан<sup>5</sup>

<sup>1-4</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

<sup>5</sup>Государственный университет науки и технологий, Улан-Батор, Монголия

**Резюме.** Цель – оценить влияние интеграции гидроаккумулирующих электростанций на установившийся режим работы Центральной энергосистемы Монголии и надежность ее функционирования в условиях роста электропотребления и увеличения доли возобновляемых источников энергии. Исследование выполнено на основе метода машинного обучения, в частности ансамблевых моделей и статистических ранговых моделей для построения модели суточного графика электропотребления, а также генерации ветровых и солнечных электростанций. Расчеты выполнялись с использованием открытого программного обеспечения Pandapower, что позволило учесть реальные технические характеристики электросетевого оборудования, провести анализ нормальных режимов и оптимизацию режимных параметров. Результаты моделирования показали, что интеграция четырех гидроаккумулирующих электростанций суммарной мощностью 250 МВт позволяет значительно сгладить неравномерность суточного графика выработки тепловых станций. Коэффициент неравномерности, показывающий отношение минимальной суточной нагрузки к максимальной, возрос с 0,8 до 0,96. Анализ режимных параметров не выявил перегрузки системообразующих линий электропередачи или недопустимого отклонения напряжения в узлах. Показано, что суммарные потери мощности в Центральной энергосистеме Монголии при интеграции гидроаккумулирующих электростанций незначительно возросли и составили 5,54% (без учета они составляли 5,36%). Это подтверждает, что перераспределение значительных объемов мощности, связанное с ростом доли возобновляемых источников энергии в энергосистеме Монголии, требует тщательного анализа технического состояния оборудования и увеличения пропускной способности линий электропередачи. Таким образом, внедрение гидроаккумулирующих электростанций к 2030 г. сделает управление режимами работы центральной энергосистемы Монголии более гибким. Это позволит увеличить внутреннее производство электроэнергии, снизить активные потери в сети, уменьшить объем импорта электроэнергии из России, сократить риски перебоев в центральном регионе Монголии и эффективно решить проблему дефицита электроэнергии.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, гидроаккумулирующая электростанция, возобновляемые источники энергии, баланс активной мощности, установившийся режим

**Для цитирования:** Сидиков Ш.Н., Русина А.Г., Осгонбаатар Т., Арестова А.Ю., Буренцагаан Б. Оценка влияния гидроаккумулирующей электростанции на нормальный режим работы электроэнергетической системы Монголии // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 583–596. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-583-596>. EDN: SJXYRX.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Assessing the impact of a pumped-storage power station on the normal operation of the Mongolian power system

Shokhrukh N. Sidikov<sup>1✉</sup>, Anastasiya G. Rusina<sup>2</sup>, Tuvshin Osgonbaatar<sup>3</sup>,  
Anna Yu. Arestova<sup>4</sup>, Boldbaatar Burentsagaan<sup>5</sup>

<sup>1-4</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

<sup>5</sup>The Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

**Abstract.** The paper is aimed at assessing the impact of integrating pumped-storage power stations on the steady-state operation of the Mongolian central power system, as well as its operational reliability, in the context

© Сидиков Ш.Н., Русина А.Г., Осгонбаатар Т., Арестова А.Ю., Буренцагаан Б., 2024

<https://ipolytech.elpub.ru>

of growing power consumption and the increasing share of renewable energy sources. The study was conducted employing the machine learning method (specifically, ensemble models and statistical ranking models) to build a model of the daily load curve, as well as the power generation of wind and solar power plants. The computations were performed using the Pandapower software, which provided a means to take into account the actual technical characteristics of power grid equipment, analyze normal conditions, and optimize the operating conditions. The modeling results indicate that the integration of four pumped-storage power stations with a total capacity of 250 MW significantly smoothes out the irregularity of the daily output curve of thermal power plants. The irregularity factor indicating the minimum-to-maximum daily load ratio increased from 0.8 to 0.96. An analysis of operating conditions did not reveal overloading of backbone transmission lines or unacceptable node voltage deviation. The total power losses in the central energy system of Mongolia were shown to increase insignificantly with the integration of pumped-storage power stations amounting to 5.54% (5.36% without taking them into account). This fact confirms that the redistribution of significant amounts of power associated with the growing share of renewable energy sources in the Mongolian power system requires a thorough analysis of the technical status of equipment and an increase in transmission line capacity. Thus, the integration of pumped-storage power stations by 2030 will make the control of the Mongolian central power system more flexible. This will increase domestic power generation, reduce ohmic losses in the grid, decrease the volume of power imports from Russia, lower the risks of outages in the central region of Mongolia, and effectively solve the power shortage problem.

**Keywords:** electric power system, pumped storage hydropower plant, renewable energy sources, active power balance, steady state

**For citation:** Sidikov S.N., Rusina A.G., Osgonbaatar T., Arestova A.Yu., Burentsagaan B. Assessing the impact of a pumped-storage power station on the normal operation of the Mongolian power system. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):583-596. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-583-596>. EDN: SJXYRX.

## ВВЕДЕНИЕ

Стратегия развития энергетики Монголии направлена на обеспечение растущей потребности электроэнергии за счет повышения доступности источников и передачи энергии, создание единой электроэнергетической системы путем интеграции региональных энергосистем, а также участие в межгосударственном объединении электроэнергетики стран Северо-Восточной Азии [1, 2]. Монголия обладает значительным ресурсом для развития солнечной и ветровой энергетики благодаря географическим и климатическим особенностям и поставила цель достичь к 2030 г. их доли в 30% [3, 4]. Однако использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ), включая солнечную и ветровую энергию, вызывает серьезные сложности при регулировании режима в связи с их неопределенностью. Имеется также ряд проблем, возникающих в изолированном режиме работы электроэнергетической системы (в частности дефицит активной и реактивной мощности), сложности регулирования напряжения и т.д. Таким образом, для достижения вышеуказанной цели возникает необходимость в новых альтернативных ресурсах, имеющих более гибкую управляемость в соответствии с характеристиками данной энергосистемы и позволяющих увеличить интеграцию ВИЭ в сеть.

Согласно современным тенденциям, активное использование системы накопления становится перспективным путем решения

поставленных задач [5, 6]. Системы накопления энергии позволяют повысить качество электроэнергии и гибкость управления режимами, а также улучшить экономическую эффективность энергетической отрасли на всех уровнях [7, 8]. Одной из широко распространенных систем накопления и достаточно изученным источником энергии является гидроаккумулирующая электростанция (ГАЭС). Основная функция данного типа систем заключается в накоплении энергии в виде запаса воды. Иначе говоря, ГАЭС будет закачивать воду в верхний резервуар, используя избыточную энергию, а именно возобновляемую энергию (в ночное время), и сбрасывать воду в нижний резервуар во время пикового спроса на электроэнергию [9, 10]. Кроме накопления энергии, ГАЭС также предлагает некоторые системные услуги, поддерживающие стабильную работу электроэнергетической системы, в том числе регулирование частоты, поддержку регулирования напряжения и реактивной мощности путем адаптации выработки в соответствии с изменениями нагрузки электроэнергетической системы или генерации из других источников, в частности ВИЭ [11]. В целом можно сказать, что ГАЭС будет играть важную роль в решении проблем снижения влияния нерегулярных компонентов, включая влияние неопределенности ВИЭ, и отвечать за обеспечение стабильной работы, надежности, гибкости и эффективности энергосистемы [12].

В рамках данной статьи в качестве объекта исследования была выбрана Центральная энергосистема (ЦЭС), которая является самой крупной энергосистемой в Монголии. На данный момент установленная мощность ЦЭС Монголии составляет 1488 МВт, из которых 84% (или 1243 МВт) приходится на теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), а остальные 16% (или 245 МВт) на ВИЭ, включая солнечные и ветровые электростанции. С точки зрения будущего состояния энергосистемы среднегодовые темпы роста электропотребления составляют 7,4%. В связи с растущей потребностью также рассматривается несколько проектов по строительству электростанций [3]. За счет реализации данных проектов установленная мощность ЦЭС будет увеличена на 2255 МВт и предположительно составит 3521 МВт. Из них 2896 МВт (или 79,9%) приходится на ТЭЦ, 190 МВт (или 5,2%) – на ветроэнергетику и 105 МВт (или 2,8%) – на солнечную энергетику соответственно. Причем в рамках проекта «Стабильность энергоменеджмента», заключенного по контракту с Ассоциацией возобновляемой энергии, Монголия планирует строительство ГАЭС. Основной целью данного проекта является покрытие пиковой нагрузки ЦЭС, снижение рисков перебоев электроэнергии, возникающих в центральном регионе Монголии, и решение проблемы дефицита электроэнергии. Во-вторых, проекты ГАЭС посвящены увеличению доли ВИЭ в энергосистеме Монголии, надежности функционирования энергосистемы. Таким образом, рассмотрение данной энергосистемы с точки

зрения реализации ГАЭС весьма актуально и недостаточно изучено на сегодняшний день.

Целью исследования является оценка влияния четырех ГАЭС суммарной установленной мощностью 250 МВт на нормальный режим работы ЦЭС Монголии.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задачей расчета является представление и проведение сравнительного анализа таких показателей, как баланс активной мощности, перетоки в сечениях, напряжение в узлах и потери в сети. В настоящее время для решения данной задачи применяется большое количество различных инструментов, в том числе Matlab, Digsilent Power Factory, Etap, Rastrwin, Дакар и др. На рис. 1 представлена предложенная блок-схема для решения поставленной задачи.

В связи с необходимостью построения серии имитационных моделей по состоянию к 2030 г. за счет обработки больших данных было принято решение использовать язык программирования Python. Так, использование открытого программного обеспечения Pandapower, имеющего большую базу аналитических инструментов, в том числе расчета нормальных режимов работы электроэнергетической системы, позволяет создавать интегрированную модель с использованием языка программирования Python. При использовании Pandapower требуется набор данных, таких как суточный график выработки и потребления электроэнергии, а также данные о структуре сети.



Рис. 1. Блок-схема системы аналитики режимов  
Fig. 1. Block diagram of the mode analysis system

Модель суточного графика нагрузки ЦЭС была построена на основе метода ансамблевой модели машинного обучения, в том числе алгоритма экстремального бустинга (XGBoost), а нагрузки для каждого узла были определены с помощью ранговых моделей [13–15]. Стоит отметить, что при составлении модели суточного графика нагрузки как энергосистемы в целом, так и ее в узлах был учтен прогноз пиковой нагрузки ЦЭС (рис. 2) [3].

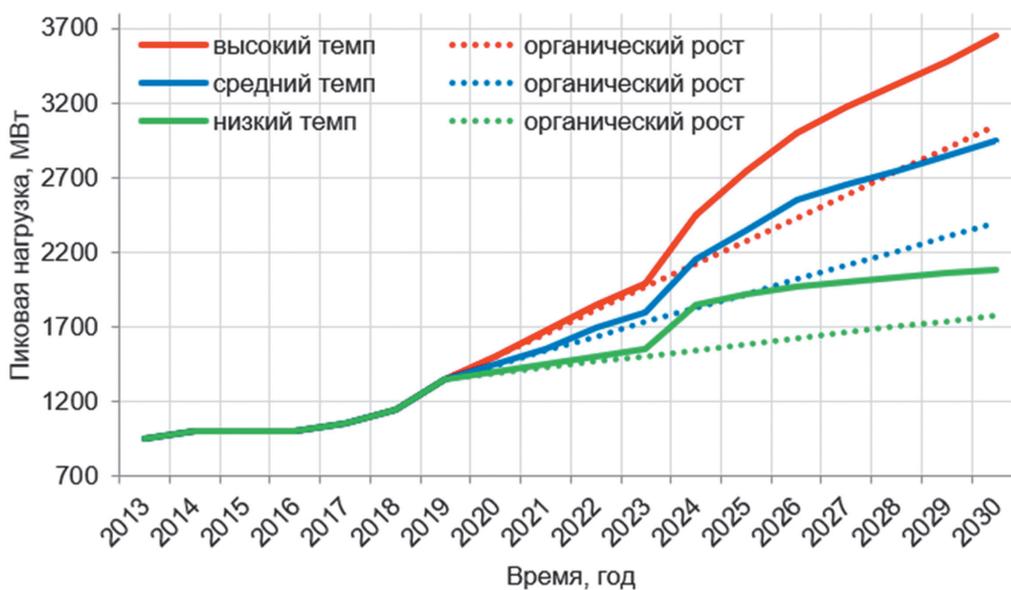
Ансамблевые модели означают множество регрессоров, рассматривающих взаимосвязь между несколькими переменными. В случае алгоритма экстремального градиентного бустинга (XGBoost) каждый регрессор строится последовательно, чтобы умень-

шить погрешность предыдущих регрессоров. Математическая формулировка имеет следующий вид:

$$\hat{Y}' = \frac{1}{q} \sum_{q=1}^Q L(y, \hat{h}_{q-1}(x)) + \hat{h}_q(x),$$

где  $L(y, \hat{h}_{q-1}(x))$  – функция погрешности;  $\hat{h}_q(x)$  – прогнозируемое значение  $q$ -го регрессора;  $Q$  – количество регрессоров или итерации;  $\hat{Y}'$  – выходная функция алгоритма или конфигурация суточного графика нагрузки энергосистемы.

В табл. 1 приведены результаты оценки корректности модели ансамблевых алгоритмов и классических методов. Результаты



**Рис. 2.** Историческая и прогнозируемая пиковая электрическая нагрузка в Монголии [3]  
**Fig. 2.** Historical and predicted peak electrical load in Mongolia [3]

**Таблица 1.** Оценка корректности моделей ансамблевых алгоритмов и классических методов  
**Table 1.** Assessing correctness of the models of ensemble algorithms and classical methods

Классические методы	ARIMA	MAPE, %	2,6
	Линейная регрессия с учетом поправок		2,3
	Линейная регрессия без поправок		2,7
Методы машинного обучения	Random Forest		1,5
	AdaBoost		1,6
	XGboost		1,3

*Примечания:* ARIMA – авторегрессионная модель скользящего среднего; линейная регрессия – регрессионная модель зависимости одной переменной от другой или нескольких переменных с линейной функцией зависимости; Random Forest – алгоритм случайного леса (Random Forest, RF); AdaBoost – алгоритм адаптивного бустинга.

показали, что отклонение прогнозов модели от фактических значений классических методов в процентах составило от 2,3 до 2,7%, а ансамблевых моделей – от 1,3 до 1,6% [13].

Поскольку ЦЭС Монголии имеет иерархическую структуру с узлами, различающимися по величине потребляемой электроэнергии, то коэффициент участия каждой подстанции был определен с помощью ранговых моделей в относительных единицах:

$$R_N = \frac{Y_N}{Y_\Sigma},$$

где  $Y_\Sigma$  – фактическое значение нагрузки ЭЭС;  $Y_N$  – фактическое значение нагрузки  $n$ -го узла;  $R_N$  – ранговый коэффициент  $n$ -го узла.

Умножив почасовые значение конфигурации суточного графика нагрузки энергосистемы на коэффициенты участия, были получены графики нагрузки подстанций:

$$\widehat{Y}_N = \widehat{Y}^i \cdot R_N,$$

где  $R_N$  – ранговый коэффициент  $n$ -го узла;  $\widehat{Y}^i$  – прогноз суточного графика нагрузки ЭЭС;  $\widehat{Y}_N$  – нагрузки  $n$ -го узла;  $N$  – номер узлов.

Как показано на рис. 2, к 2030 г. пиковая нагрузка ЦЭС Монголии составит около 3000 МВт, если крупный горнодобывающий проект Оюу Толгой будет снабжаться от данной энергосистемы при учете средних годовых темпов роста потребления электроэнергии. При составлении модели баланса активной мощности также была учтена информация о проектах строительства электростан-

ций (табл. 2) к 2030 г. За счет реализации данных проектов установленная мощность ЦЭС будет увеличена на 2255 МВт.

Суточные графики генерации ВИЭ, таких как ветровые и солнечные электростанции, были смоделированы на основе AdaBoost [16, 17], являющегося одним из ансамблевых алгоритмов машинного обучения:

$$\widehat{Y}^i = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q w_q \widehat{h}_q(x),$$

где  $\widehat{h}_q(x)$  – прогнозируемое значение  $q$ -го регрессора;  $w_q$  – весовой коэффициент -го регрессора;  $Q$  – количество регрессоров или итерации;  $\widehat{Y}^i$  – выходная функция алгоритма.

Очевидно, что результат каждого регрессора взвешивается коэффициентами. Другими словами, при построении модели каждая входная переменная играет соответствующую роль в зависимости от ее ошибки. Стоит отметить, что при построении вышеизложенных моделей были использованы почасовые данные как электроэнергии, так и метеофакторов за 3 года.

После прогнозирования суточных графиков, таких как электропотребление энергосистемы и ее узлов, а также генерации ВИЭ была создана модель энергетической системы с помощью библиотеки Pandas и Pandarpower.

Расчет установившегося режима работы энергетической системы основан на методе Ньютона-Рафсона [18–20]. Метод Ньютона-Рафсона – это численный метод

**Таблица 2.** Проекты строительства электростанций  
**Table 2.** Power plant construction projects

№	В проекте	Установленная мощность, МВт
1	Аккумуляторные батареи	80
2	Тавантолгой КЭС	450
3	Багануур КЭС	400
4	Буурулжуут КЭС	300
5	Багахангай КЭС	300
6	Расширение на Улан-Баторской ТЭЦ-3	325
7	Расширение на Улан-Баторской ТЭЦ-2	100
8	Солнечная ЭС	15
9	Ветровая ЭС	35
10	Херленская ГАЭС	45
11	Хуйтенская ГАЭС	30
12	Майханская ГАЭС	75
13	Ерууская ГАЭС	100
Итого		2255

Примечание: КЭС – конденсационная электростанция; ЭС – электростанция.

для нахождения приближенного значения корня уравнения. Данный метод основан на итеративном процессе, в котором на каждой итерации вычисляется новое приближение корня путем квадратичной аппроксимации функции в окрестности текущего приближения. Математическая формулировка имеет следующий вид:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f'(x_n)}{f''(x_n)},$$

где  $x_n$  – текущее приближение корня;  $f(x)$  – функция, у которой мы ищем корень;  $f'(x_n)$ ,  $f''(x_n)$  – ее производные.

При расчете установившегося режима работы электроэнергетической системы методом Ньютона-Рафсона необходимо задать начальные значение параметров электрической сети как для узлов, так и для ветвей. Затем алгоритм решения системы уравнений будет итеративно корректировать заданные параметры до достижения нормального режима. На рис. 3 показана блок-схема алгоритма Ньютона второго порядка.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Баланс активной мощности.** Как правило, импорт/экспорт электроэнергии ограничен по ряду технических причин и должен быть в пределах предварительно установленной величины двумя сторонами. Таким образом, баланс активной мощности энергосистемы обеспечивается электроэнергией, вырабатываемой на ТЭЦ, с учетом текущей выработки ВИЭ в соответствии с предусмотренным планом импорта/экспорта, как показано на рис. 4.

На графике видно, что ТЭЦ не могут вырабатывать электроэнергию в базовом режиме, поскольку существуют определенные вариации в графиках выработки ВИЭ, таких как ветровые (ВЭС) и солнечные электростанции (СЭС), и имеется большая разница в электропотреблении в ночные и пиковые периоды. На рис. 5 показан суточный график режима работы четырех гидроэлектростанций суммарной установленной мощностью 250 МВт, перечисленных в табл. 1.

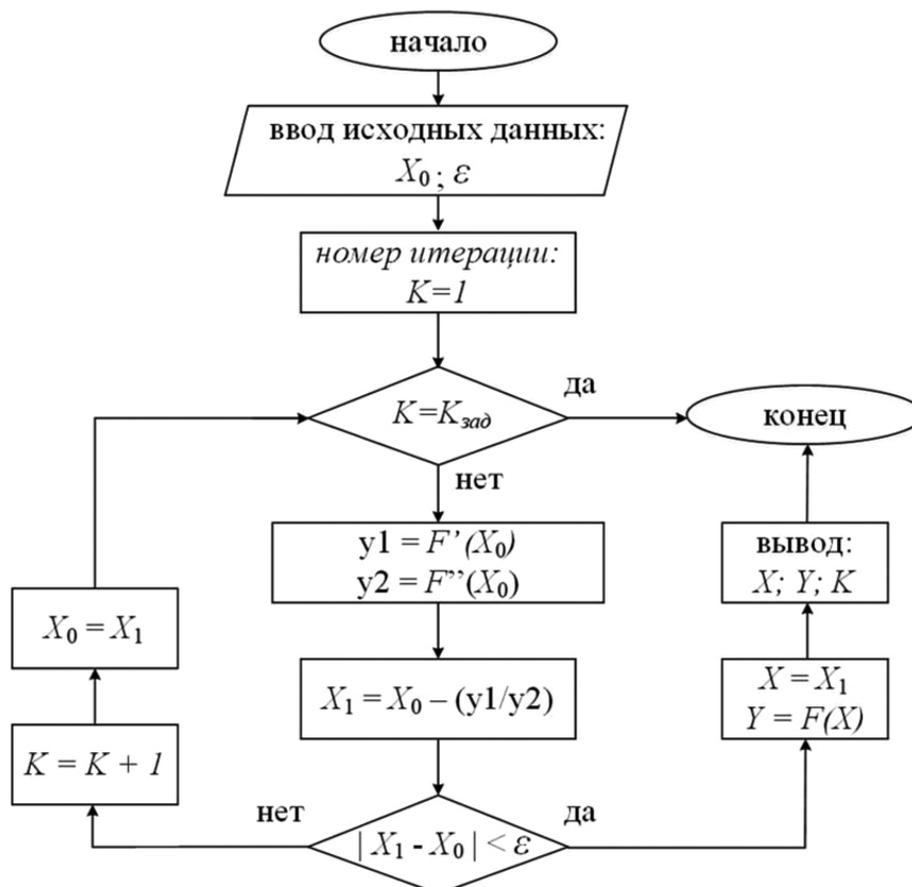


Рис. 3. Блок-схема метода Ньютона второго порядка  
Fig. 3. Newton Raphson method flowchart

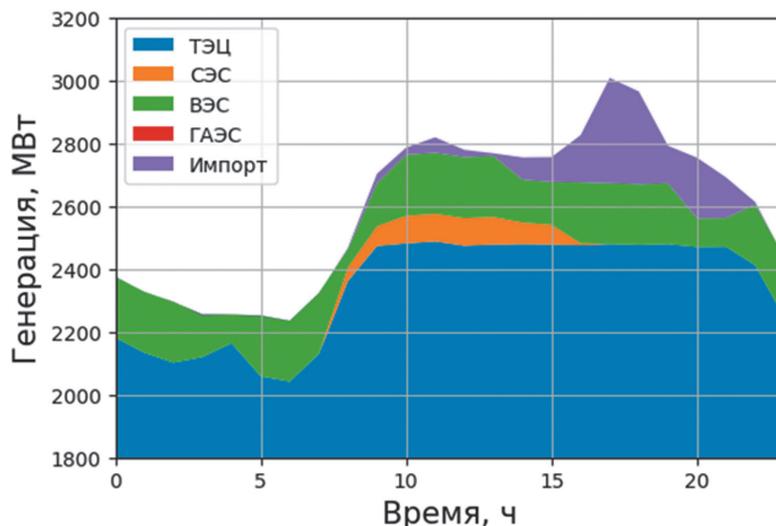


Рис. 4. Баланс активной мощности без учета гидроаккумулирующей электростанции  
Fig. 4. Active power balance with no regard for the pumped storage power plant

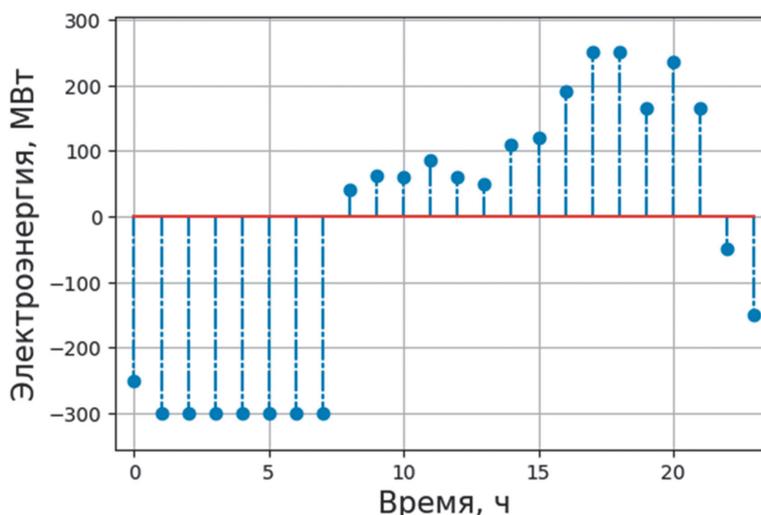


Рис. 5. Суточный график работы гидроаккумулирующей электростанции  
Fig. 5. Daily operating schedule of the pumped storage power plant

Из рис. 5 видно, что в ночное время ГАЭС потребляют до 300 МВт электроэнергии из сети для перекачки воды в верхний резервуар для накопления, а днем вырабатывают электроэнергию, расходуя накопленную воду. Баланс активной мощности с учетом графика данных ГАЭС представлен на рис. 6.

При интеграции ГАЭС в ЦЭС Монголии возникают следующие преимущества:

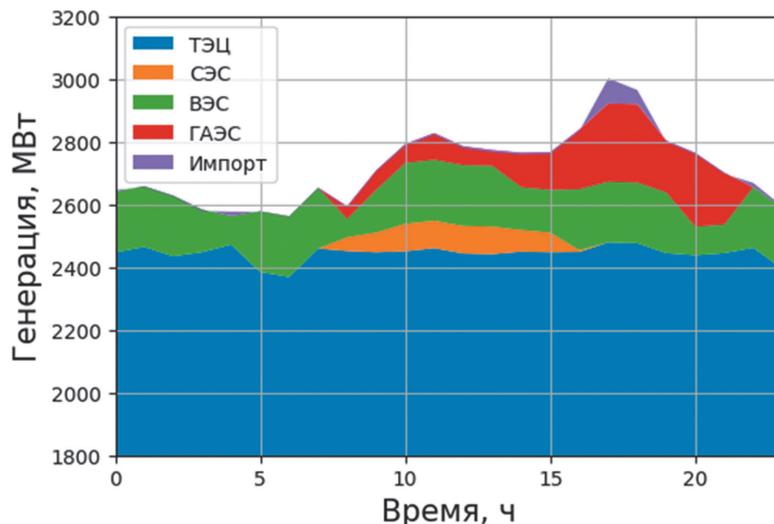
- ГАЭС позволяют выравнять суточный график нагрузки энергосистемы, особенно в ночное время. Так, что ТЭЦ будут обеспечены условием базового режима, как показано на рис. 7.

- ГАЭС позволяют увеличить долю использования ВИЭ вне зависимости от метеофак-

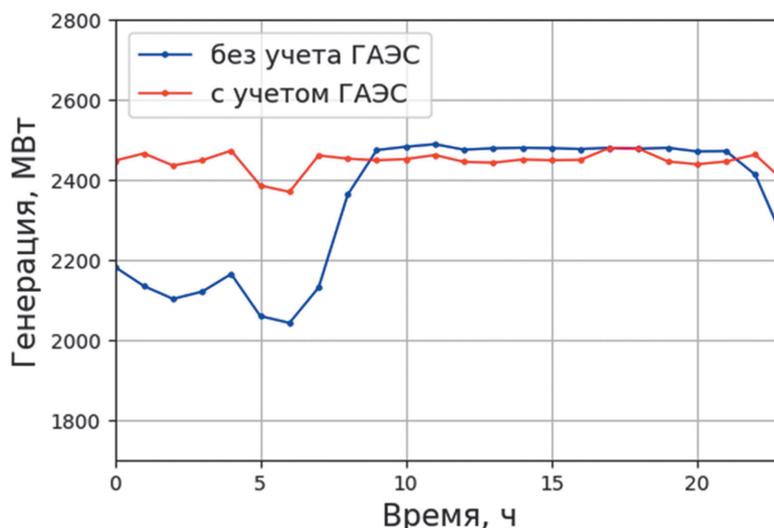
торов, поскольку имеют более гибкое функционирование. Также появляется возможность минимизации объема потребляемого ископаемого топлива на ТЭЦ.

- ГАЭС будут играть балансирующую роль активной мощности в сети вместо импорта и/или экспорта электроэнергии.

**Анализ электрических режимов.** На рис. 8 представлена схема ЦЭС Монголии, на которой проводился расчет установившегося режима. Стоит отметить, что в расчетах установившегося режима были использованы реальные данные сетевого оборудования. Был также учтен баланс активной мощности, представленный на рис. 6.



**Рис. 6.** Баланс активной мощности с учетом гидроаккумулирующей электростанции  
**Fig. 6.** Active power balance with regard for the pumped storage power plant



**Рис. 7.** Суточные графики выработки теплоэлектростанции  
**Fig. 7.** Daily schedules of thermal power plant generation

На рис. 9 показано отсутствие существенных изменений и нарушений режимов напряжения в течение суток на узловых подстанциях 220 кВ «Дархан», «Эрдэнэт», «Улан-Батор», «Багануур» и «Тавантолгой». Напряжение на шинах других удаленных подстанций 110 кВ «Хархорин», «Баянхонгор», «Баруун-Урт» и «Ундурхаан» повышается в ночной период и понижается в пиковый период, но не выходит за допустимые пределы отклонений. Такое поведение наблюдается как в случае без учета ГАЭС, так и с ее учетом, что означает отсутствие влияния режимов работы ГАЭС на узловое напряжение.

В результатах расчета электрических режимов также можно увидеть изменение гра-

фиков суточных потерь в исследуемой сети (рис. 10).

На рис. 9–11 представлены графики напряжений на шинах подстанций, потери в сети и загрузки в сечениях.

На рис. 10 видно, что графики потерь в сети в дневной период незначительно отличаются как в случае без учета ГАЭС, так и в случае с ее учетом. Основное различие между двумя случаями наблюдается в ночной период, что связано с работой ГАЭС в режиме потребителя. Средние потери без учета ГАЭС составили 5,36% от общего электропотребления ЦЭС Монголии, при ее учете – 5,54%. Таким образом, ГАЭС влияют на потери активной мощности в сети незначительно.

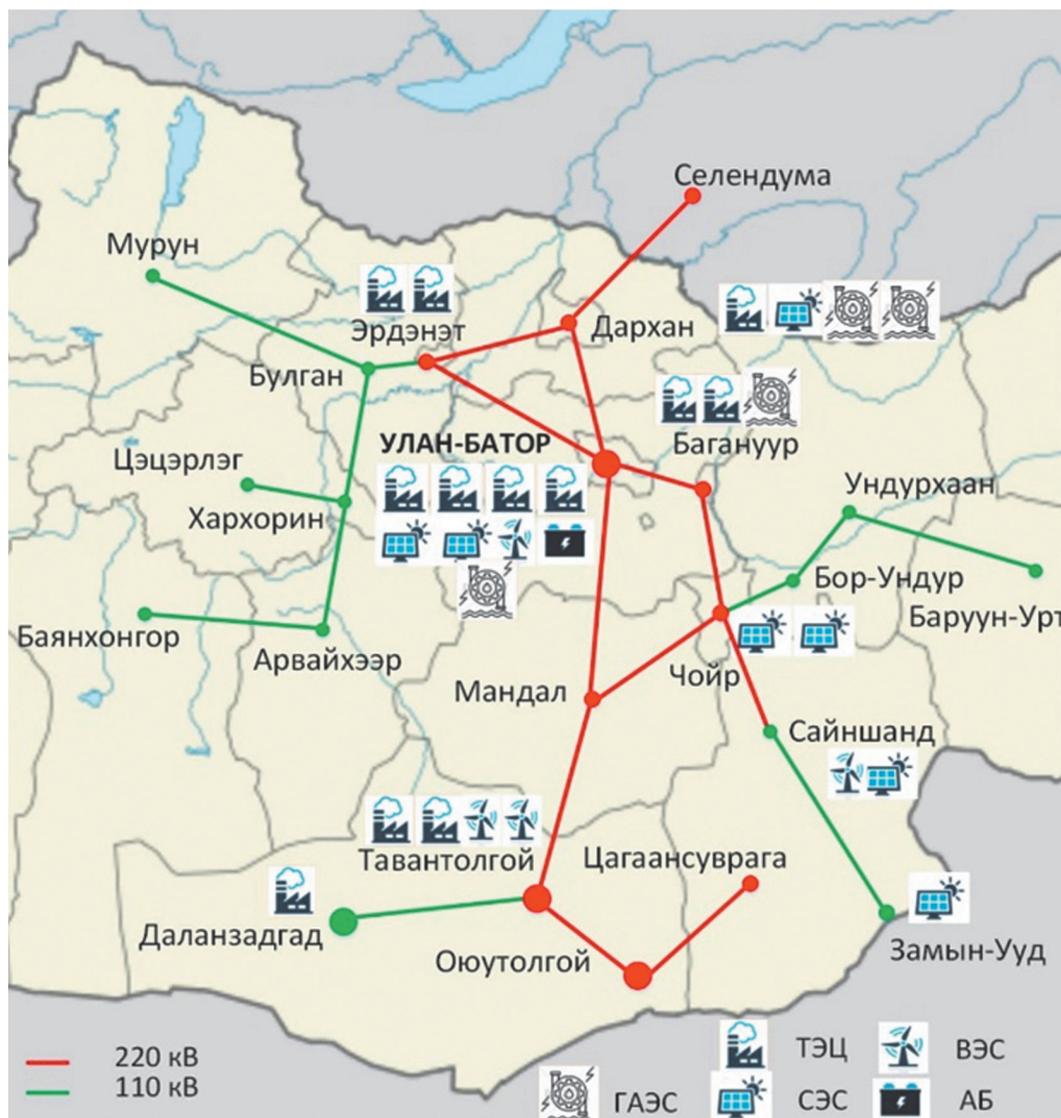


Рис. 8. Схема Центральной энергосистемы Монголии  
 Fig. 8. Diagram of the Central Power System of Mongolia

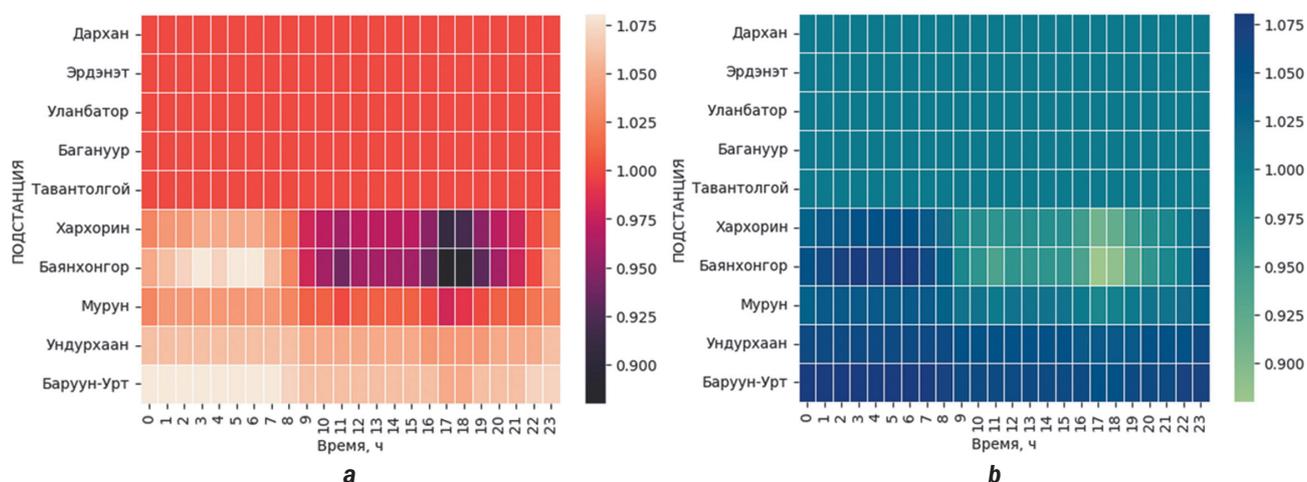


Рис. 9. Напряжения на шинах подстанций без учета гидроаккумулирующей электростанции (a) и с учетом гидроаккумулирующей электростанции (b)  
 Fig. 9. Substation bus voltages with (a) and without (b) regard for the pumped storage power plant

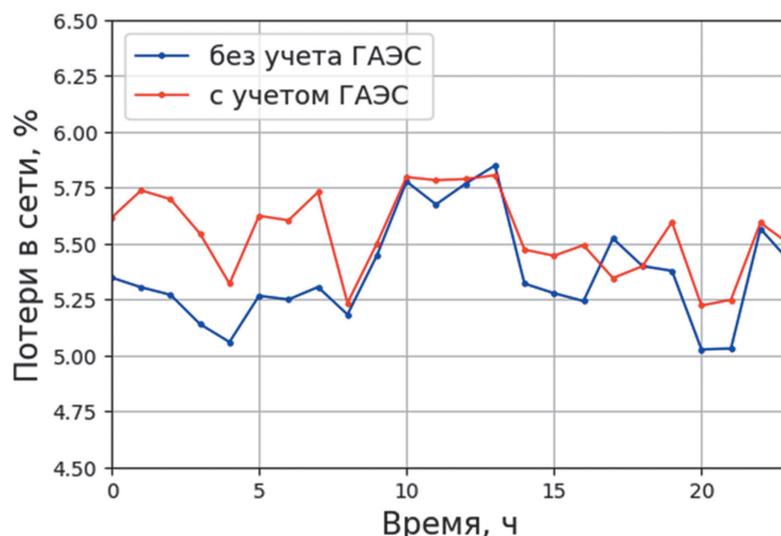
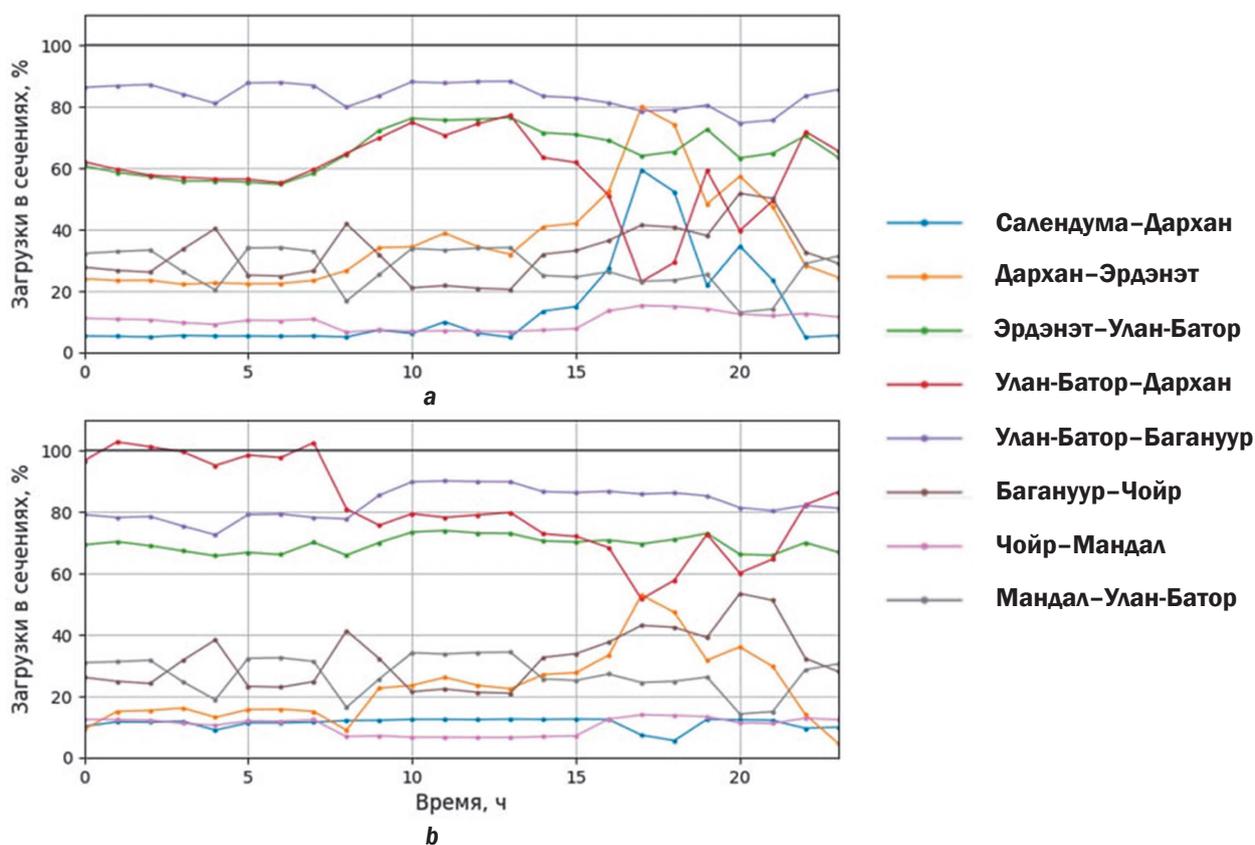


Рис. 10. Суточные графики потерь мощности в сети  
Fig. 10. Daily graphs of network active losses



На рис. 11 показаны перетоки активной мощности в контролируемых сечениях.

Очевидно, что в обоих случаях перегрузки в каждом сечении отсутствуют, за исключением сечения «Улан-Батор-Дархан» при подключении Ерууской и Хуйтенской ГАЭС суммарной мощностью 130 МВт. Данная небольшая перегрузка связана с потреблением электроэнергии этих ГАЭС для перекачки воды в ночное время.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящего исследования рассмотрены особенности и перспективы развития ЦЭС Монголии. Одной из актуальных тем в развитии данной энергосистемы считается использование системы накопления электроэнергии, в частности, использование ГАЭС. Целью работы является оценка влияния ГАЭС на нормальные режимы работы электроэнергетической

системы с большой долей ВИЭ. Для достижения поставленной цели возникла необходимость построить серию имитационных моделей ЦЭС Монголии к 2030 г. согласно проектному году ввода в эксплуатацию рассматриваемых ГАЭС. В работе были использованы ансамблевые модели машинного обучения, в том числе алгоритм экстремального бустинга и адаптивного бустинга. В работе также была учтена информация о перспективе ввода других объектов генерации и нагрузки в энергетической отрасли Монголии.

С помощью языка программирования Python был рассчитан баланс активной мощности, а также проведен анализ параметров нормального режима работы ЦЭС Монголии. Полученные в результате математического моделирования результаты показали, что интеграция рассматрива-

емых четырех ГАЭС суммарной установленной мощностью 250 МВт не оказывает негативного влияния на нормальный режим работы ЦЭС Монголии. Генерация из данных источников, особенно в пиковые периоды, позволяет увеличить внутреннее производство электроэнергии, снизить активные потери в сети и объем электроэнергии импорта из России. Выявлено, что существуют небольшие изменения таких параметров, как потери в сети, напряжения на шинах подстанций и перетоки в сечениях, но они находятся в пределах нормы. Вдобавок к тому следует заметить, что с помощью ГАЭС управление режимами работы ЦЭС Монголии станет более гибким, что позволит увеличить использование ВИЭ, которое напрямую зависит от метеорологических факторов, и сократить потребление ископаемого топлива на ТЭЦ.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bat-Erdene B., Voropai N.I., Batmunkh S., Zhargalsaikhan B., Lyankhtsetseg S., Bat-Undral B. Methodological framework for planning the development of Mongolia's electric power systems and energy industry // *Energy Systems Research*. 2023. Vol. 4. Iss. 6. P. 5–24. <https://doi.org/10.25729/esr.2023.04.0001>.
2. Bat-Erdene B., Batmunkh S., Battulga M. The problems in development modelling of Mongolian power energy systems // *IEEE Region 10 Symposium (TENSYPMP)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/TENSYPMP52854.2021.9550833>.
3. 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/SIBIR-CON56155.2022.10016986>.
4. Harrucksteiner A., Thakur J., Franke K., Sensfuß F. A geospatial assessment of the techno-economic wind and solar potential of Mongolia // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2023. Vol. 55. P. 102889. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102889>.
5. Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Коротков И.Ю., Нестеренко Г.Б., Пранкевич Г.А. Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт // *Энергетическая политика*. 2020. № 6. С. 76–87. <https://en.energypolicy.ru>.
6. Elalfy D.A., Gouda E., Kotb M.F., Bures V., Sedhom B.E. Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends // *Energy Strategy Reviews*. 2024. Vol. 54. P. 101482. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101482>.
7. Rahman M.M., Oni A.O., Gemechu E., Kumar A. Assessment of energy storage technologies: a review // *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 223. P. 113295. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113295>.
8. Behabtu H.A., Messagie M., Coosemans T., Berecibar M., Fante K.A., Kebede A.A., et al. A review of energy storage technologies' application potentials in renewable energy sources grid integration // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Iss. 24. P. 10511. <https://doi.org/10.3390/su122410511>.
9. Alvarez G. Operation of pumped storage hydropower plants through optimization for power systems // *Energy*. 2020. Vol. 202. P. 117797. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117797>.
10. Gerini F., Vagnoni E., Cherkaoui R., Paolone M. Optimal short-term dispatch of pumped-storage hydropower plants including hydraulic short circuit // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2024. P. 1–11. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2024.3463951>.
11. Ruppert L., Schürhuber R., List B., Lechner A., Bauer C. An analysis of different pumped storage schemes from a technological and economic perspective // *Energy*. 2017. Vol. 141. P. 368–379. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.057>.
12. 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.
13. 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>.

14. Wang Yuanyuan, Sun Shanfeng, Chen Xiaoqiao, Zeng Xiangjun, Kong Yang, Chen Jun, et al. Short-term load forecasting of industrial customers based on SVM and XGBoost // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021. Vol. 129. P. 106830. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106830>.
15. Wang Delu, Gan Jun, Mao Jinqi, Chen Fan, Yu Lan. Forecasting power demand in China with a CNN-LSTM model including multimodal information // *Energy*. 2023. Vol. 263. Part E. P. 126012. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126012>.
16. Dosdoğru A.T., İpek A.Ä. Hybrid boosting algorithms and artificial neural network for wind speed prediction // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. Iss. 3. P. 1449–1460. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.154>.
17. Abdellatif A., Mubarak H., Ahmad S., Ahmed T., Shafiullah G.M., Hammoudeh A., et al. Forecasting photovoltaic power generation with a stacking ensemble model // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Iss. 17. P. 11083. <https://doi.org/10.3390/su141711083>.
18. Alawneh S.G., Zeng Lei, Arefifar S.A. A review of high-performance computing methods for power flow analysis // *Mathematics*. 2023. Vol. 11. Iss. 11. P. 2461. <https://doi.org/10.3390/math11112461>.
19. Thurner L., Scheidler A., Schäfer F., Menke J., Dollichon J., Meier F. Pandapower – an open-source Python tool for convenient modeling, analysis, and optimization of electric power systems // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 33. Iss. 6. P. 6510–6521. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2829021>.
20. Грязина Е.Н., Балуев Д.Ю. Исследование допустимых и предельных режимов работы энергетических систем // *Автоматика и телемеханика*. 2024. № 5. С. 112–128. <https://doi.org/10.31857/S0005231024050047>. EDN: YQDRMJ.

### References

1. Bat-Erdene B., Voropai N.I., Batmunkh S., Zhargalsaikhan B., Lyankhtsetseg S., Bat-Undral B. Methodological framework for planning the development of Mongolia's electric power systems and energy industry. *Energy Systems Research*. 2023;4(6):5-24. <https://doi.org/10.25729/esr.2023.04.0001>.
2. Bat-Erdene B., Batmunkh S., Battulga M. The problems in development modelling of Mongolian power energy systems. In: *IEEE Region 10 Symposium (TENSymp)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/TENSymp52854.2021.9550833>.
3. 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/SIBIR-CON56155.2022.10016986>.
4. Harrucksteiner A., Thakur J., Franke K., Sensfuß F. A geospatial assessment of the techno-economic wind and solar potential of Mongolia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2023;55:102889. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102889>.
5. Zyryanov V.M., Kiryanova N.G., Korotkov I.Yu., Nesterenko G.B., Parankevich G.A. Energy storage systems: Russian and international experience. *Energy policy*. 2020;6:76-87. (In Russ.). <https://en.energypolicy.ru>.
6. Elalfy D.A., Gouda E., Kotb M.F., Bures V., Sedhom B.E. Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends. *Energy Strategy Reviews*. 2024;54:101482. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101482>.
7. Rahman M.M., Oni A.O., Gemechu E., Kumar A. Assessment of energy storage technologies: a review. *Energy Conversion and Management*. 2020;223:113295. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113295>.
8. Behabtu H.A., Messagie M., Coosemans T., Berecibar M., Fante K.A., Kebede A.A., et al. A review of energy storage technologies' application potentials in renewable energy sources grid integration. *Sustainability*. 2020;12(24):10511. <https://doi.org/10.3390/su122410511>.
9. Alvarez G. Operation of pumped storage hydropower plants through optimization for power systems. *Energy*. 2020;202:117797. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117797>.
10. Gerini F., Vagnoni E., Cherkaoui R., Paolone M. Optimal short-term dispatch of pumped-storage hydropower plants including hydraulic short circuit. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2024;1-11. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2024.3463951>.
11. Ruppert L., Schürhuber R., List B., Lechner A., Bauer C. An analysis of different pumped storage schemes from a technological and economic perspective. *Energy*. 2017;141:368-379. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.057>.
12. 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 of the Kazan State Agrarian University*. 2021;13(2):119-132. (In Russ.). EDN: RXEUZU.
13. 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>.
14. Wang Yuanyuan, Sun Shanfeng, Chen Xiaoqiao, Zeng Xiangjun, Kong Yang, Chen Jun, et al. Short-term load forecasting of industrial customers based on SVM and XGBoost. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021;129:106830. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106830>.

15. Wang Delu, Gan Jun, Mao Jinqi, Chen Fan, Yu Lan. Forecasting power demand in China with a CNN-LSTM model including multimodal information. *Energy*. 2023;263(E):126012. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126012>.
16. Dosdoğru A.T., İpek A.Ä. Hybrid boosting algorithms and artificial neural network for wind speed prediction. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(3):1449-1460. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.154>.
17. Abdellatif A., Mubarak H., Ahmad S., Ahmed T., Shafiullah G.M., Hammoudeh A., et al. Forecasting photovoltaic power generation with a stacking ensemble model. *Sustainability*. 2022;14(17):11083. <https://doi.org/10.3390/su141711083>.
18. Alawneh S.G., Zeng Lei, Arefifar S.A. A review of high-performance computing methods for power flow analysis. *Mathematics*. 2023;11(11):2461. <https://doi.org/10.3390/math11112461>.
19. Thurner L., Scheidler A., Schäfer F., Menke J., Dollichon J., Meier F. Pandapower – an open-source Python tool for convenient modeling, analysis, and optimization of electric power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018;33(6):6510-6521. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2829021>.
20. Gryazina E.N., Baluev D.Yu. Investigation of feasible and limiting operating regimes of electric power systems. *Avtomatika i Telemekhanika*. 2024;5:112-128. <https://doi.org/10.31857/S0005231024050047>. EDN: YQDRMJ.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### **Сидиков Шохрух Нуридинович,**

аспирант,  
Новосибирский государственный  
технический университет,  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия  
✉ shohruh\_98\_98@bk.ru

##### **Shokhrukh N. Sidikov,**

Postgraduate Student,  
Novosibirsk State Technical University,  
20, Prospect K. Marksa, Novosibirsk 630073, Russia  
✉ shohruh\_98\_98@bk.ru

##### **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>

##### **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>

##### **Осгонбаатар Тувшин,**

аспирант,  
Новосибирский государственный  
технический университет,  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия  
o.tuvshin.21@gmail.com

##### **Tuvshin Osgonbaatar,**

Postgraduate Student,  
Novosibirsk State Technical University,  
20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk 630073, Russia  
o.tuvshin.21@gmail.com

##### **Арестова Анна Юрьевна,**

ст. преподаватель,  
кафедра автоматизированных  
электроэнергетических систем,  
Новосибирский государственный  
технический университет,  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия  
arestova@corp.nstu.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-6486-4858>

##### **Anna Yu. Arestova,**

Senior Lecturer of the  
Automated Electric Power System Department,  
Novosibirsk State Technical University,  
20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk 630073, Russia  
arestova@corp.nstu.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-6486-4858>

##### **Буренцагаан Болдбаатар,**

аспирант,  
Монгольский государственный университет  
науки и технологий,  
14191, г. Улан-Батор, Бага-тойруу, 34, Монголия  
bu.boldbaatar@gmail.com

##### **Boldbaatar Burentsagaan,**

Postgraduate Student,  
The Mongolian University of Science and Technology,  
34, Baga-toiruu, Ulaanbaatar 14191, Mongolia  
bu.boldbaatar@gmail.com

#### Заявленный вклад авторов

#### Authors' contribution

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to the article.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 28.09.2024 г.; одобрена после рецензирования 26.10.2024 г.; принята к публикации 18.11.2024 г.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

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

**Information about the article**

The article was submitted 28.09.2024; approved after reviewing 26.10.2024; accepted for publication 18.11.2024.

Original article

EDN: SIYCGX

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-597-611



## An approach to estimate the equivalent parameters of a wind farm with DFIGs during wind gusts based on data-driven analysis

Jianhua Chen<sup>1</sup>, Ligu Wang<sup>2</sup>✉, Alena Dreglea<sup>3</sup>, Elena Chistyakova<sup>4</sup>, Chunlai Yu<sup>5</sup>

<sup>1,2</sup>Harbin Institute of Technology, Harbin, China

<sup>3,4</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>4</sup>Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>5</sup>Dalian Maritime University, Dalian, China

**Abstract.** The purpose of the study is to develop an approach based on online measurements and the theory of Ritt–Wu characteristic sets from the field of algebraic geometry and computer algebra to solve one of the main tasks of wind energy studies such “abandon wind” caused by wind gusts. The Ritt–Wu theory is effective in studying polynomial systems and their solutions. To obtain an equivalent double-fed induction generator, the following basic steps are used: build the characteristic sets by modeling a wind farm; establish the polynomial rings based on the real-time aggregation data; derive analytical expressions of a model of an equivalent double-fed induction generator; validate of the developed approach to modeling an double-fed induction generator using mathematical modeling in the PSCAD software environment and analysis of a combination of model data and telemetry data. A general solution procedure is used, which can be applied to obtain the analytical expressions of the inductance and impedance of an equivalent wind farm. The expediency and effectiveness of the developed approach is illustrated by the example of a real wind farm with a capacity of 50 MW with 34 double-fed induction generators. The simulation results demonstrate that the obtained parameters of an equivalent double-fed induction generator can accurately follow wind speed fluctuations with a lower error. Thus, this study presents a new effective method for estimating the exact equivalent parameters of a wind farm during wind gusts. The developed method is suitable for obtaining the analytical solutions of equivalent wind farm parameters in real time. Validation of the accuracy and speed of the author’s method has been carried out. Moreover, this study can be applied to any wind farms equipped with double-fed induction generators.

**Keywords:** equivalent parameter, data-driven approach, characteristic set, analytical solution, wind farm

**Funding.** The study was partially supported by the Beijing Science and Technology Project of China (MH20210194) and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project FZZS- 2024-0003.

**For citation:** Chen Jianhua, Wang Ligu, Dreglea A., Chistyakova E., Yu Chunlai. An approach to estimate the equivalent parameters of a wind farm with DFIGs during wind gusts based on data-driven analysis. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):597-611. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-597-611>. EDN: SIYCGX.

### ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.548

## Оценка эквивалентных параметров ветроэлектростанций с асинхронными генераторами во время порывов ветра: подход на основе анализа данных

Ц. Чэнь<sup>1</sup>, Л. Ван<sup>2</sup>✉, А. Дрегля<sup>3</sup>, Е. Чистякова<sup>4</sup>, Ч. Юй<sup>5</sup>

<sup>1,2</sup>Харбинский технологический институт, Харбин, Китай

<sup>3,4</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

<sup>4</sup>Институт динамики систем и теории управления им. В.Ф. Матросова СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>5</sup>Даляньский морской университет, Далянь, Китай

**Резюме.** Цель исследования – для решения одной из основных задач ветроэнергетики, связанной с порывами ветра, разработать подход, основанный на онлайн измерениях и теории характеристических множеств

Ритта-Ву из области алгебраической геометрии и компьютерной алгебры. Теория Ритта-Ву эффективна при изучении полиномиальных систем и их решений. Для получения эквивалентного асинхронного генератора с двойным питанием применяются основные шаги: построение характеристических множеств путем моделирования ветропарка; создание полиномиальных колец на основе регистрации и обработки данных в режиме реального времени; вывод аналитических выражений модели эквивалентного асинхронного генератора с двойным питанием; валидация разработанного подхода к моделированию асинхронного генератора с двойным питанием с помощью математического моделирования в программной среде PSCAD и анализа комбинации модельных данных и данных телеметрии. Использована общая процедура решения, которая может быть применена для получения аналитических выражений индуктивности и импеданса эквивалентной ветряной электростанции. Целесообразность и эффективность разработанного подхода проиллюстрирована на примере реального ветропарка мощностью 50 МВт с 34 асинхронными генераторами с двойным питанием. Результаты моделирования демонстрируют, что полученные параметры эквивалентного асинхронного генератора с двойным питанием могут точно следовать колебаниям скорости ветра с меньшей погрешностью. Таким образом, в данном исследовании представлен новый эффективный метод оценки точных эквивалентных параметров ветропарка во время порывов ветра. Разработанный метод подходит для получения аналитических решений эквивалентных параметров ветропарка в реальном времени. Проведена валидация точности и быстродействия авторского метода. Более того, данное исследование может быть применено к любой ветроэлектростанции, использующей асинхронные генераторы с двойным питанием.

**Ключевые слова:** эквивалентный параметр, подход, основанный на данных, характеристическое множество, аналитическое решение, ветроэлектростанция

**Финансирование.** Исследование было частично поддержано Пекинским научно-техническим проектом Китая (МН20210194) и Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, проект FZZS-2024-0003.

**Для цитирования:** Чэнь Ц., Ван Л., Дрегла А., Чистякова Е., Юй Ч. Оценка эквивалентных параметров ветроэлектростанций с асинхронными генераторами во время порывов ветра: подход на основе анализа данных. *iPolytech Journal*. 2024. Т. 28. № 4. (In Eng.). С. 597–611. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-597-611>. EDN: SIYCGX.

## INTRODUCTION

The wind gusts can disrupt the operation of wind farms and cause “wind abandonment” due to sub-synchronous resonance (SSR) occurring between the feeder line and the wind farm, which has become a major obstacle to further development of wind power in Northeastern China [1, 2]. To analyze the occurrence mechanism of SSR, wind farms with double-fed induction generators (DFIGs) can be modeled as a single DFIG using an equivalence method based on the output data of the wind farm [3]. For this purpose, two issues should be addressed: (1) Accuracy: the parameters of DFIG are constantly change due to dynamic changes in stator and rotor temperatures. (2) Efficiency: the equivalent parameters of the wind farm under wind gusts need to be quickly evaluated as they are the basis for assessing wind farm instability. As discussed above, it is necessary to develop an approach that can accurately and efficiently estimate the equivalent parameters of a wind farm when wind gusts occur.

In order to meet the demand for accurate and efficient suppression of SSR, the entire wind farm should be aggregated into a single DFIG with online changing parameters. Investigation shows that, as shown in Table

1, there are many suitable equivalent algorithms for aggregating a wind farm which including modeling type and structure of DFIG, power load flow calculations, aggregation of wind farm system, clustering algorithm, Prony algorithm, dynamic equivalence of hybrid farms and aggregation by frequency domain impedance, etc. These methods have been successfully applied and achieved corresponding effects in practical examples. However, in order to overcome perturbed equivalent parameters of the wind farm online. The emergence of the data-driven approach provides a solution to the negative effects of the wind gusts.

Currently, data-driven approaches have been seen as promising solutions for optimizing controlled plants under external perturbations. As shown in Table 2, the data-driven approach can take different forms depending on a particular application. It consists of model-free adaptive control, model-free sliding control, virtual reference feedback tuning, iterative feedback tuning and, adaptive leaning control etc. These methods have demonstrated excellent performance and functionality in analyzing complex control system. However, considering the computation demand for the online estimation of equivalent parameters

**Table 1.** Wind farm aggregation algorithm

**Таблица 1.** Алгоритм агрегации ветроэлектростанции

Order	Algorithm	Ref	Note	
1	Modeling type and structure of DFIG	[3]	On-line?	
2	Load flow calculation	Conventional load flow	[4]	×
		Equivalent wind load	[5]	×
		Probabilistic load flow	[6]	×
3	Aggregation of wind farm system	Aggregation of wind speed	[7]	×
		Dynamic equivalent modeling	[8]	×
		Multi-machine equivalent model	[9]	×
4	Clustering algorithm	Layout design and yaw control	[10]	×
		Custer power prediction	[11]	×
		Optimization of clustered wind	[12]	×
5	Prony algorithm	Probabilistic clustering algorithms	[13]	×
		Combined MEEMD-Prony	[14]	×
6	Time-frequency-domain equivalent modeling	[15]		
7	Wind speed point-interval fuzzy forecasting	[16]	×	
8	Decoupled impedance modeling	[17]	×	

**Table 2.** Data-driven approach methods

**Таблица 2.** Методы, связанные с подходом, основанным на данных

Order	Algorithm	Accuracy	Rapidity
1	Model-free adaptive control	Restrict and influence each other, it is hard to reconcile performance parameters	
2	Model free sliding mode		
3	Iterative feedback tuning		
4	Adaptive learning control		
5	Fuzzy neural networks		
6	Virtual reference feedback tuning		

during wind gusts, there is still a trade-off between accuracy and efficiency that needs to be addressed to fully utilize the potential of data-driven methods.

Here we propose a data-driven approach to estimate the online equivalent parameters of a wind farm, which corresponds to the real-time sampling data. The main contribution of this study is the development of a faster and more efficient algorithm for identifying changing parameters of the equivalent DFIG. We suggest the following algorithm: (1) Construct a characteristic set consisting of unknown equivalent parameters by modeling the wind farm; (2) Establish polynomial rings associated with real-time aggregation current, voltage and slip ratio; (3) Derive analytical expressions for the inductance and impedance of the equivalent DFIG via zero decomposition of the characteristic set [18–25]; (4) Validate the equivalent DFIG using pseudo-residual analysis and simulation based on Power System Computer Aided Design (PSCAD). These

steps are integrated into a general data-driven procedure that can be used to obtain the equivalent parameters of a wind farm online. The feasibility and validity of the proposed approach are illustrated with a 50 MW wind farm that comprises 34 DFIGs connected to a 35 kV distribution system. Simulation results show that the errors in the active power and reactive power between the equivalent DFIG model and the actual wind farm are less than 5 and 10% respectively.

### MODELING AND SOLVING WIND FARM PROBIEMS

In this paper, we use a wind farm with DFIGs as the research background to validate the proposed approach. As shown in Fig. 1, a 50 MW wind farm consisting of 34 DFIGs has been considered. The capacity, frequency and pole pair number of each DFIG is 1.5 MW, 50 Hz and 2 respectively. The detailed parameters of a DFIG associated with Eq. (1) to (7) are given in Table 3.

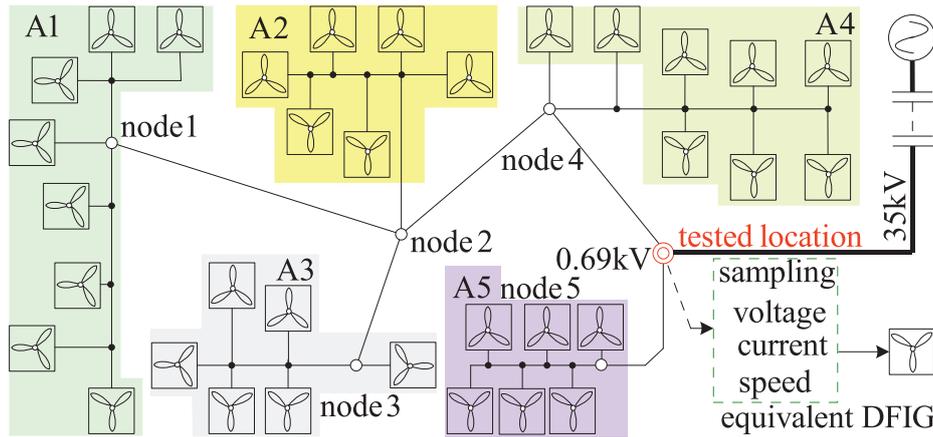


Fig. 1. Transmission system topology of the wind farm with 34 DFIGs

Рис. 1. Топология системы передачи данных ветроэлектростанции с 34 асинхронными генераторами

Table 3. Detailed DFIG parameters

Таблица 3. Подробные параметры DFIG

Order	Parameter	Unit	Note	Order	Parameter	Unit	Note
1	$R_s$	$\Omega$	Stator resistance	10	$Q_s$	kVar	Stator reactive power
2	$R_r$	$\Omega$	Rotor resistance	11	$U_G$	V	Terminal voltage
3	$L_s$	mH	Stator inductance	12	$\psi_{ds}$	Wb	d-axis component of stator flux linkage
4	$L_r$	mH	Rotor inductance	13	$\psi_{qs}$	Wb	q-axis component of stator flux linkage
5	$L_m$	mH	Mutual inductance	14	$\psi_{dr}$	Wb	d-axis component of rotor flux linkage
6	$s$	-	Slip ratio	15	$\psi_{qr}$	Wb	q-axis component of rotor flux linkage
7	$i_{sd} / i_{sq}$	A	Stator active/Reactive current	16	$\omega_s$	rad/s	Synchronous angular velocity of DFIG
8	$i_{rd} / i_{rq}$	A	Rotor active/Reactive current	17	$\omega_r$	rad/s	Rotor angular velocity of DFIG
9	$P_s / P_r$	kW	Active power of stator/rotor	18	$T_e$	kNm	Rotor torque of DFIG

**A. Analysis of characteristic set method**

Accurate modeling and efficient solving of a wind farm are the basis for estimating its equivalent parameters. To this end, the Ritt-Wu's characteristic set method [24] has been used to derive an analytical solution for the equivalent DFIG, which can serve as a foundation for the proposed general data-driven approach.

The characteristic set method was developed for ordinary difference polynomial systems [25]. This method includes fields, polynomials, ascending chains, and Pseudo-remainders analysis based on zero decomposition for difference polynomial systems.

In order to use the characteristic set method to estimate the equivalent parameters of a wind farm, we need to check whether a coherent difference chain is proper irreducible. For this purpose, the following issues should be addressed:

1) determine the difference chain from the wind farm;

2) extract the characteristic set based on modeling of the equivalent DFIG;

3) construct polynomial ring  $R = K\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  over  $K$  by modeling the wind farm;

4) obtain the analytical expressions of unknown parameters by eliminating coupled variables of the characteristic set based on zero decomposition.

**B. Data-driven approach based on characteristic set**

To increase the system stability and extract maximum energy associated with the wind speed during wind gusts, the entire wind farm need to be aggregated as a DFIG. Fig. 2 shows the equivalent model of the wind farm corresponding to Fig. 1.

Fig. 2 shows that the calculation efficiency will be improved rapidly due to the fact that the calculating nodes of the equivalent model have been significantly decreased.

The equivalent DFIG consists of a wound rotor induction generator and an AC/DC/AC IGBT-based PWM converter. The stator winding is connected directly to the 50 Hz grid while the rotor is fed at variable frequency through the AC/DC/AC converter.

Neglecting the electromagnetic transient, the steady-voltage equation for the equivalent DFIG can be represented as:

$$u_{sd} = i_{sd}R_s - i_{sq}L_s - i_{rq}L_m; \quad (1a)$$

$$u_{sq} = i_{sq}R_s + i_{sd}L_s + i_{rd}L_m; \quad (1b)$$

$$u_{rd} = -si_{sq}L_m + i_{rd}R_r - si_{rq}L_r; \quad (1c)$$

$$u_{rq} = si_{sd}L_m + i_{rq}R_r + si_{rd}L_r. \quad (1d)$$

Usually, there are following relationships in the framework of stator voltage reference:

$$u_{sq} = U_G; \quad (2a)$$

$$u_{sd} = 0; \quad (2b)$$

$$P_s = u_{sd}i_{sd} + u_{sq}i_{sq} = U_G i_{sq}; \quad (2c)$$

$$Q_s = u_{sd}i_{sq} - u_{sq}i_{sd} = -U_G i_{sd}. \quad (2d)$$

Also, the d-q axis components of rotor current can be represented as:

$$i_{rq} = (i_{sd}R_s - i_{sq}L_s - u_{sd}) / L_m; \quad (3a)$$

$$i_{rd} = (u_{sq} - i_{sq}R_s - i_{sd}L_s) / L_m. \quad (3b)$$

Based on above formulas, the rotor active power can be written as:

$$P_r = u_{rd}i_{rd} + u_{rq}i_{rq} = (-si_{sq}L_m + i_{rd}R_r - si_{rq}L_r) \times (u_{sq} - i_{sq}R_s - i_{sd}L_s) / L_m + (si_{sd}L_m + i_{rd}R_r + si_{rq}L_r)(i_{sd}R_s - i_{sq}L_s - u_{sd}) / L_m. \quad (4)$$

We select  $\mathbb{X} = \{\mathbb{P}, \mathbb{W}\}$  as the chain, where  $\mathbb{P} = \{u_{sd}, i_{sd}, u_{sq}, i_{sq}, u_{rd}, i_{rd}, u_{rq}, i_{rq}, s\}$  and  $\mathbb{W} = \{R_s, L_s, R_r, L_r, L_m\}$ .

Define the Eq. (1) and (4) as the characteristic set. Corresponding polynomial rings can be written as following expressions:

$$f_1 = u_{sd} - i_{sd}R_s + i_{sq}L_s + i_{rq}L_m = 0; \quad (5a)$$

$$f_2 = u_{sq} - i_{sq}R_s - i_{sd}L_s - i_{rd}L_m = 0; \quad (5b)$$

$$f_3 = u_{rd} + si_{sq}L_m - i_{rd}R_r + si_{rq}L_r = 0; \quad (5c)$$

$$f_4 = u_{rq} - si_{sd}L_m - i_{rq}R_r - si_{rd}L_r = 0; \quad (5d)$$

$$f_5 = P_r - u_{rd}i_{rd} - u_{rq}i_{rq} = 0. \quad (5e)$$

And then by zero decomposing the polynomial rings, based on eliminating the coupling variables, the equivalent parameters of the wind farm have been derived:

$$R_s = (i_{ds}u_{ds} + i_{qs}u_{qs}) / (i_{qs}^2 + i_{ds}^2); \quad (6a)$$

$$L_s = (i_{ds}u_{qs} - i_{qs}u_{ds}) / (i_{qs}^2 + i_{ds}^2); \quad (6b)$$

$$R_r = (i_{dr}u_{dr} + i_{qr}u_{qr}) / (i_{qr}^2 + i_{dr}^2); \quad (6c)$$

$$L_r = (P_r i_{dr} - i_{dr}^2 u_{dr} - i_{qr}^2 u_{qr}) / [i_{qr} s (i_{qr}^2 + i_{dr}^2)]; \quad (6d)$$

$$L_m = (y_1 + y_2) / [s (i_{qs}^2 + i_{ds}^2) (i_{qr}^2 + i_{dr}^2) i_{ds} i_{qs}]. \quad (6e)$$

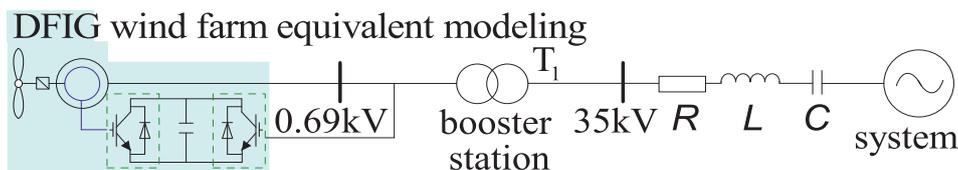


Fig. 2. Equivalent model of the wind farm with DFIG

Рис. 2. Эквивалентная модель ветроэлектростанции с асинхронными генераторами

Where, the intermediate variable  $y_1$  and  $y_2$  have the form:

$$y_1 = i_{qr}^2 i_{ds}^2 P_r - i_{qr}^3 i_{ds}^2 u_{qr} - i_{qr}^2 i_{ds}^2 u_{dr} i_{dr}; \quad (7a)$$

$$y_2 = -i_{qr}^2 i_{qs}^2 u_{dr} i_{dr} - i_{dr}^2 i_{ds}^2 P_r - i_{qr}^3 i_{qs}^2 u_{qr}. \quad (7b)$$

Since  $\mathbb{P} = \{u_{sd}, i_{sd}, u_{sq}, i_{sq}, u_{rd}, i_{rd}, u_{rq}, i_{rq}, s\}$  can be seen as known variables at every sampling period, the unknown variables  $\mathbb{X} = \{R_s, L_s, R_r, L_r, L_m\}$  can be calculated online according to Eq. (6) and (7). Table 4 provides a summary of the results given above.

In Table 4, parameter  $\mathbb{P}$  is a set of r-pols under descending chain;  $A = A_1, A_2, \dots, A_p$  is a finite sequence of nonzero r-pols;  $\text{Zero}(\mathbb{P})$  denotes the set of solutions of  $\mathbb{P} = 0$ ;  $\mathfrak{B}$  is characteristic set,  $\mathfrak{B} = C.S(\mathbb{P})$  is a characteristic set of  $\mathbb{P}$ .

### ANALYSIS AND VALIDATION OF PROPOSED DATA DRIVEN APPROACH

In accordance with Fig. 1, a 50 MW wind farm has been considered, which is located in the northeastern China. The farm consists of thirty-four 1.5 MW DFIGs connected to a 0.69 kV distribution system, which exports power to the 35 kV grid through a 15 km feeder line. The corresponding sampled data were measured by a phasor measurement unit (PMU).

#### A. Data driven approach analysis

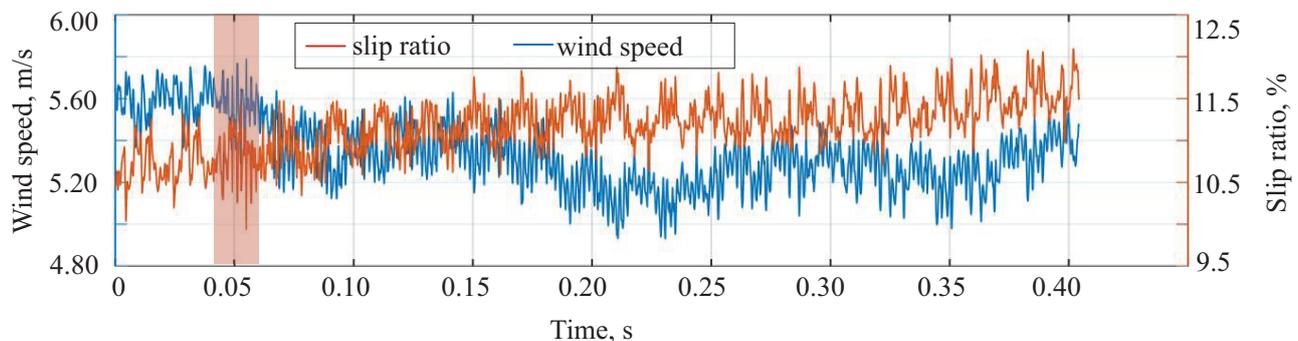
Based on the sampled voltage, current, and wind speed from the farm the influence of wind gusts on the slip ratio, rotor current and torque is shown in Fig. 3–5.

Comparison of Fig. 3, 4 and 5 shows that there is relationship near time 0.05 s: wind

**Table 4.** Data-driven algorithm procedure

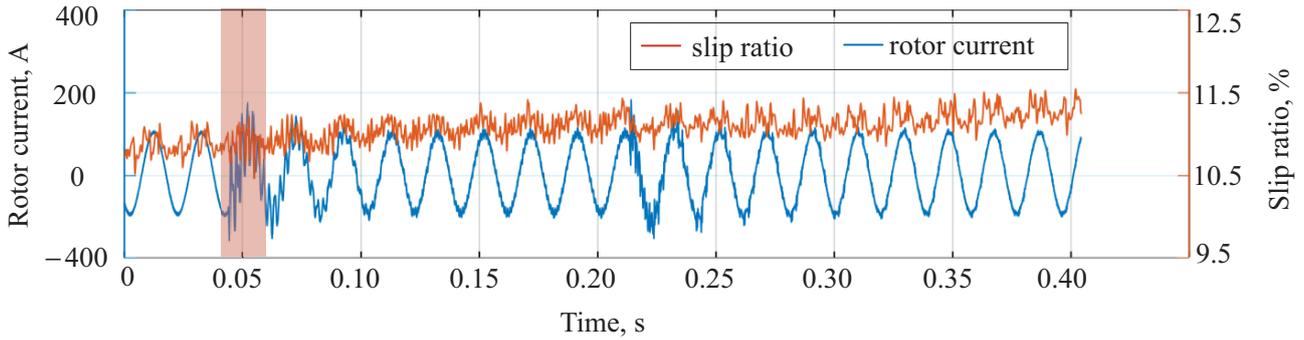
**Таблица 4.** Порядок работы алгоритма, основанного на данных

<p><b>1. Input:</b> a finite set <math>\mathbb{P} = \{u_{sd}, i_{sd}, u_{sq}, i_{sq}, u_{rd}, i_{rd}, u_{rq}, i_{rq}, s\}</math> of r-pols</p>
<p><b>2. Output:</b> <math>W = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\} = \{R_s, L_s, R_r, L_r, L_m\}</math> which every <math>A_i</math> element is coherent proper irreducible difference chain and <math>\text{Zero}(\mathbb{P}) = \bigcup_{i=1}^5 \text{Zero}(\text{sat}(A_i))</math></p>
<p><b>3. Begin:</b> Call Eq. (1) and (4) <math>\mathfrak{B} = C.S(\mathbb{P}), \mathfrak{B} = B_1, B_2, B_3, B_4, B_5</math> If <math>\mathfrak{B} = 1</math> then <math>W = \{1\}</math> Else <math>\mathbb{R} = \{ \text{prem}(f, \mathfrak{B}) \neq 0 \mid f \in (\mathbb{P} \setminus B) \cup \Delta(\mathfrak{B}) \},</math> If <math>\mathbb{R} = \emptyset</math> then test <math>\mathbb{P}</math> Construct new characteristic set Eq. (6), repeat 3</p>
<p><b>4. Validate:</b> Calculate Eq. (6) to (7) based on sampling <math>\mathbb{P}</math> Tested power -simulated power <math>&lt; \delta</math>? Where <math>\delta</math> is the error Yes, End the procedure No, repeat 3</p>

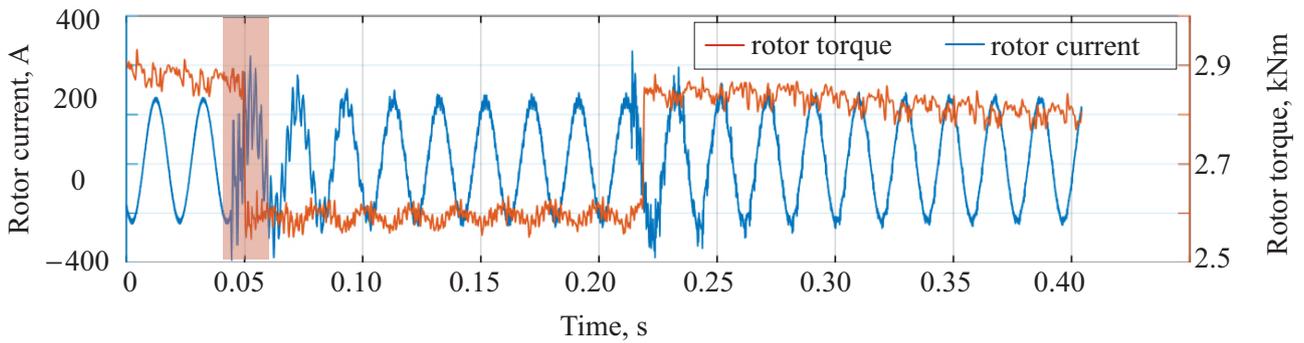


**Fig. 3.** Wind speed and wind farm slip

**Рис. 3.** Скорость ветра и скольжение ветроэлектростанции



**Fig. 4.** Instantaneous rotor current and wind farm slip  
**Рис. 4.** Мгновенный ток ротора и проскальзывание ветроэлектростанции



**Fig. 5.** Instantaneous current and torque of the wind farm rotor  
**Рис. 5.** Мгновенный ток и крутящий момент ротора ветроэлектростанции

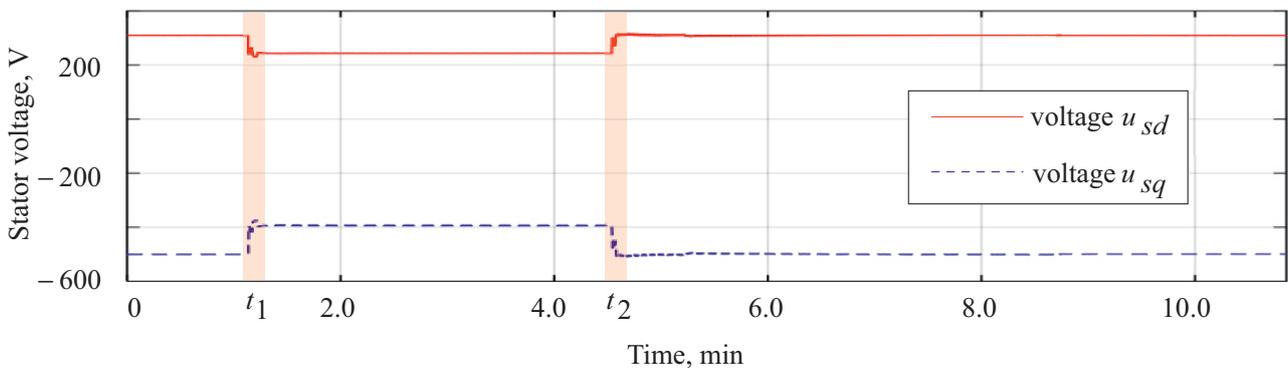
gusts  $\rightarrow$  perturbed slip ratio  $\rightarrow$  resonant current  $\rightarrow$  disturbed torque which is also reflected by Eq. (1c) and (1d).

Fig. 6–10, corresponding to the set  $\mathbb{P} = \{u_{sd}, i_{sd}, u_{sq}, i_{sq}, u_{rd}, i_{rd}, u_{rq}, i_{rq}, s\}$ , show the sampling voltage, current and active power associated with Eq. (1) and (4).

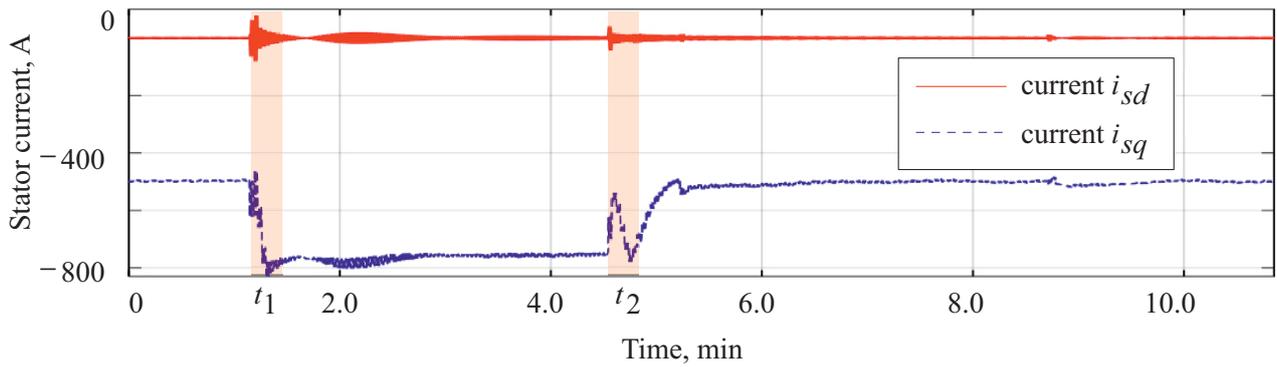
Fig. 6–10 show that there are remarkable perturbations at time  $t_1$  and  $t_2$  due to the influence of wind gusts. Contrarily, we can analyze the influence of wind gusts by analyzing the voltage and current of the equivalent DFIG.

Fig. 11–15, corresponding to the set  $\mathbb{X} = \{R_s, L_s, R_r, L_r, L_m\}$ , show the estimation parameters of the equivalent DFIG according to Table 4. Due to Eq. (6), it makes the estimation procedure of Table 4 run with higher accuracy and higher efficiency.

Additionally, there are similar parameters perturbation near the time  $t_1$  and  $t_2$  which means that the equivalent parameters can be used to represent the influence of wind gusts.

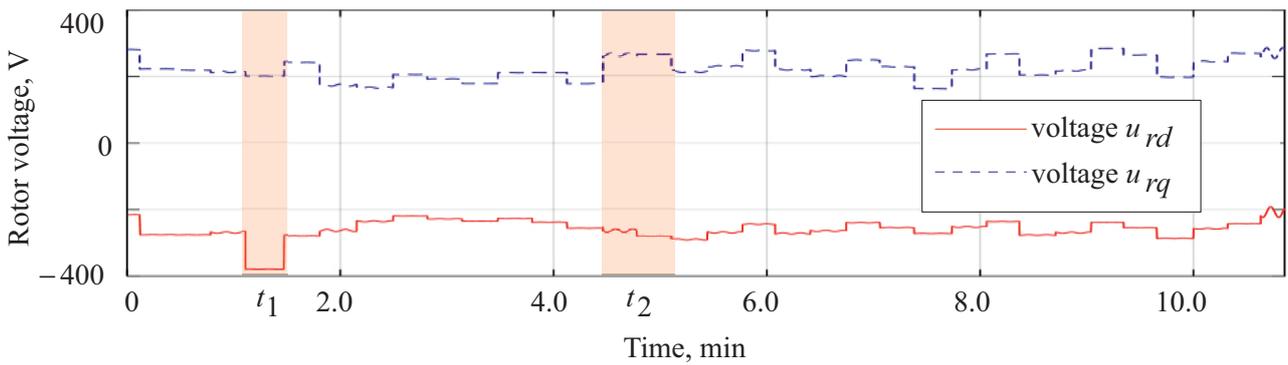


**Fig. 6.** Stator voltage components of the equivalent DFIG in dq coordinate system  
**Рис. 6.** Составляющие напряжения статора эквивалентного асинхронного генератора в системе координат dq



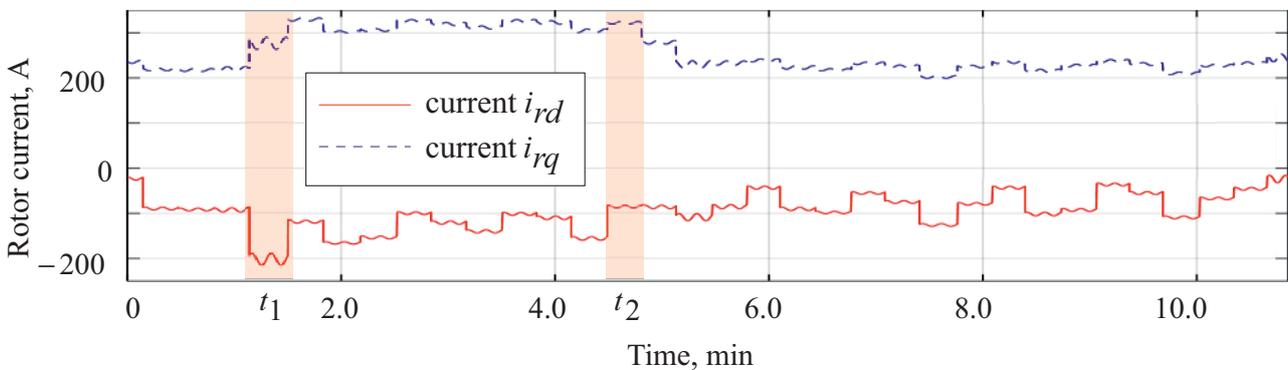
**Fig. 7.** Stator current components of the equivalent DFIG in dq coordinate system

**Рис. 7.** Составляющие тока статора эквивалентного асинхронного генератора в системе координат dq



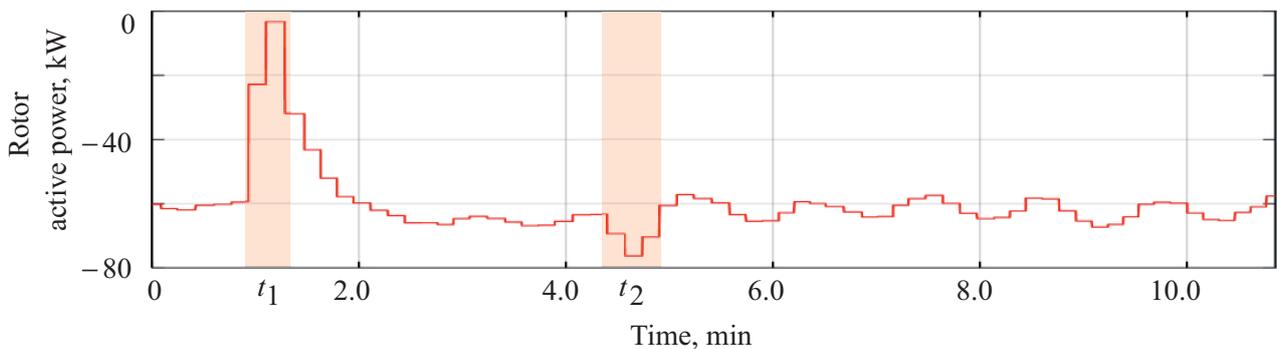
**Fig. 8.** Rotor voltage components of the equivalent DFIG in dq coordinate system

**Рис. 8.** Составляющие напряжения на роторе эквивалентного асинхронного генератора в системе координат dq



**Fig. 9.** Rotor current components of the equivalent DFIG in dq coordinate system

**Рис. 9.** Составляющие тока ротора эквивалентного асинхронного генератора в системе координат dq



**Fig. 10.** Rotor active power of the equivalent DFIG

**Рис. 10.** Активная мощность ротора эквивалентного асинхронного генератора

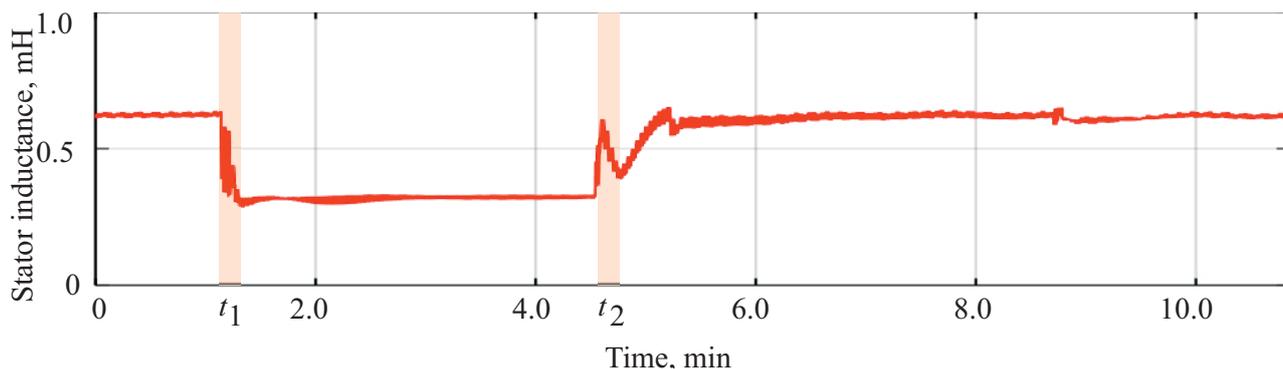


Fig. 11. Stator inductance of equivalent DFIG by proposed method

Рис. 11. Индуктивность статора эквивалентного асинхронного генератора по предлагаемому способу

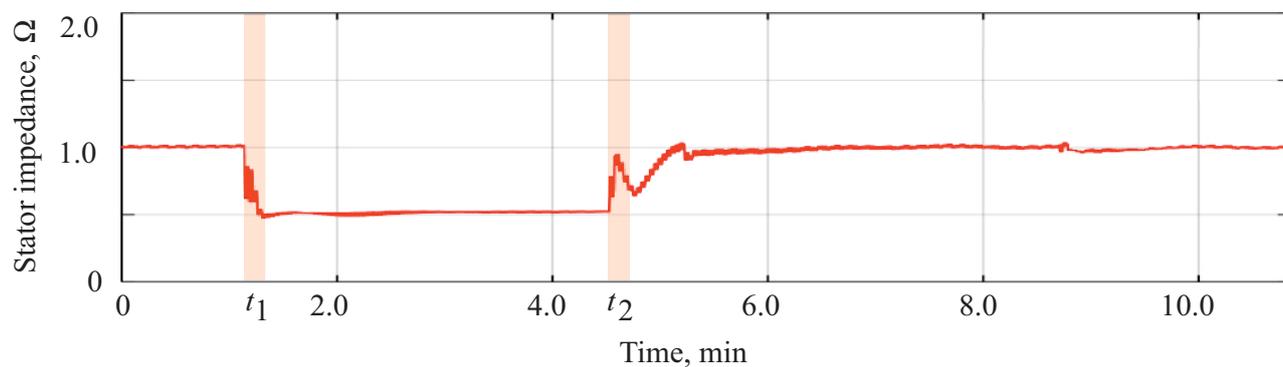


Fig. 12. Stator impedance of equivalent DFIG by proposed method

Рис. 12. Полное сопротивление статора эквивалентного асинхронного генератора по предлагаемому способу

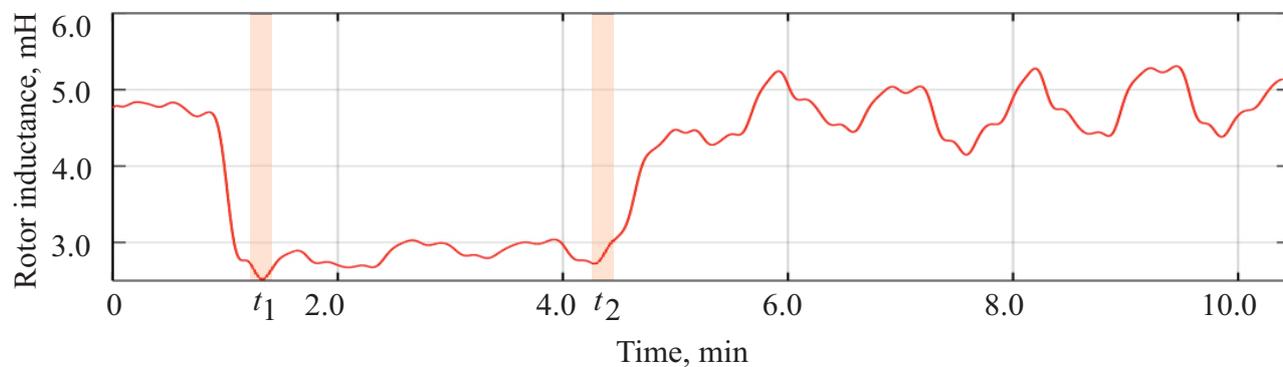


Fig. 13. Rotor inductance of equivalent DFIG by proposed method

Рис. 13. Индуктивность ротора эквивалентного асинхронного генератора по предлагаемому способу

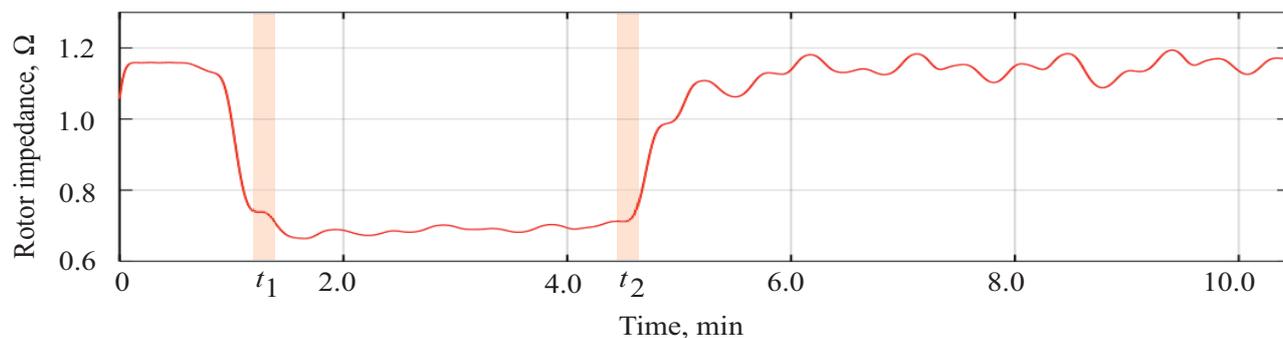


Fig. 14. Rotor impedance of equivalent DFIG by proposed method

Рис. 14. Полное сопротивление ротора эквивалентного асинхронного генератора в среде по предлагаемому способу

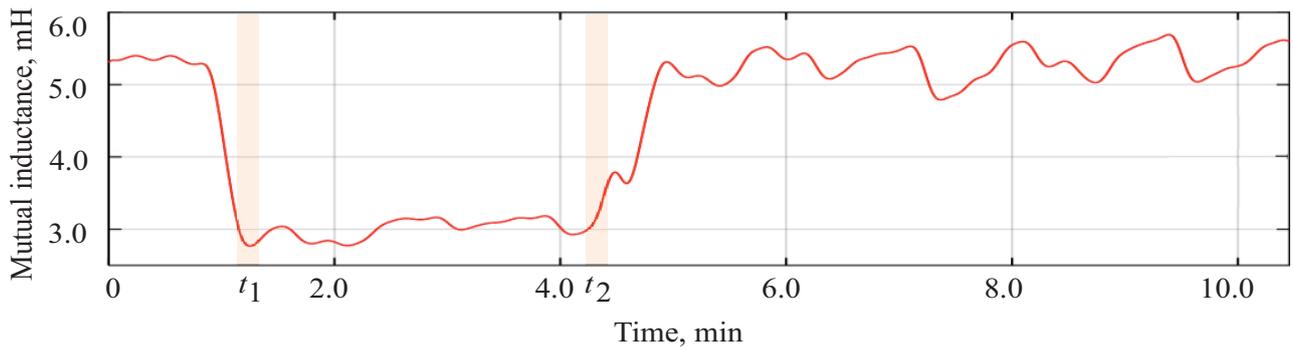


Fig. 15. Mutual impedance of equivalent DFIG by proposed method

Рис. 15. Взаимное сопротивление эквивалентного асинхронного генератора по предлагаемому способу

The estimation parameters (average value) of the equivalent DFIG within the testing time are shown in Table 5.

**B. Validation of data-driven approach**

In order to validate correctness of the estimation parameters of the equivalent DFIG with parameters shown in Table 5 and corresponding to Fig. 1, the topology of the simulation model and the simulation model of the equivalent DFIG has been proposed and shown in Fig. 16 and 17.

Fig. 17 shows a 50 MW equivalent DFIG connected to a 0.69 kV distribution system which parameters are exactly the same as shows in Table 5. Fig. 16 shows that this model consists of a wound rotor induction generator and an excitation converter. The stator winding is connected directly to the 50 Hz grid, while the rotor is fed at variable frequency through the AC/DC/AC converter. In this model, the wind speed is changed from 4.8 m/s to 6.0 m/s.

Table 5. Estimation parameters (average value) of equivalent DFIG

Таблица 5. Оценочные параметры (среднее значение) эквивалентного асинхронного генератора

Order	Parameter	Unit	Estimation value	Note
1	$R_s$	$\Omega$	0.8380	Stator resistance
2	$R_r$	$\Omega$	0.9859	Rotor resistance
3	$L_s$	mH	0.5134	Stator inductance
4	$L_r$	mH	4.1052	Rotor inductance
5	$L_m$	mH	4.5451	Mutual inductance

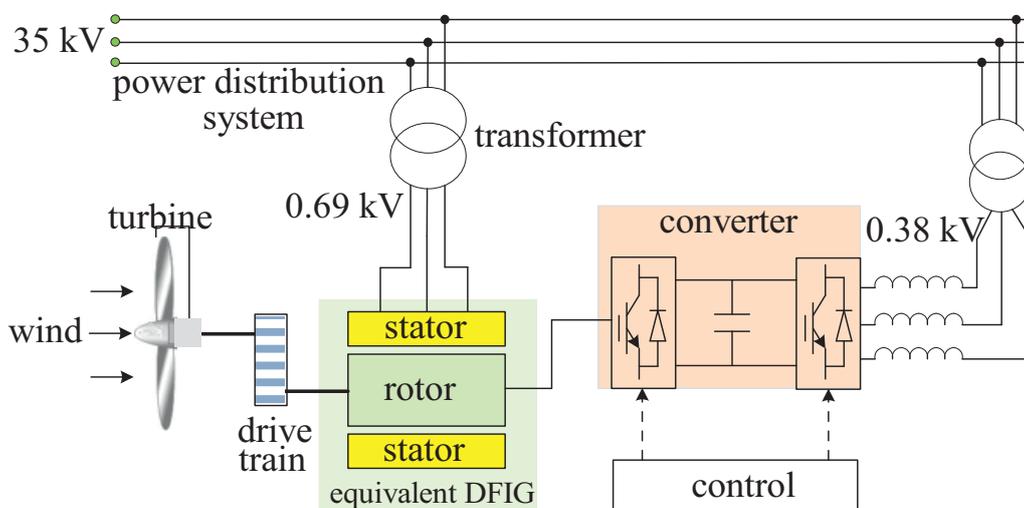
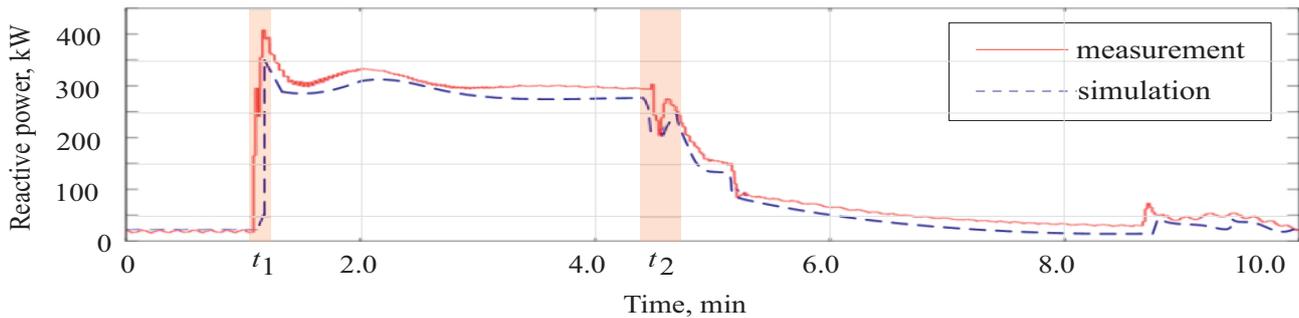


Fig. 16. Topology of the simulation model of the equivalent DFIG

Рис. 16. Топология имитационной модели эквивалентного асинхронного генератора





**Fig. 19.** Simulation of the equivalent DFIG based on PSCAD

**Рис. 19.** Моделирование эквивалентного асинхронного генератора в среде PSCAD

**Table 6.** Analysis of the maximum error between simulated and tested power of the equivalent DFIG

**Таблица 6.** Анализ максимальной погрешности между моделируемой и протестированной мощностью эквивалентного асинхронного генератора

Order	Parameters	Maximum error $\delta$ , %	
		absolute	relative
1	Active power, kW	28.588	4.52
2	Reactive power, kVar	48.896	9.42

The accuracy of the estimated parameters of the equivalent DFIG can be verified from two perspectives:

1. By comparing Fig. 18 to 19, it is clear that there are significant fluctuations of stator active power and reactive power of the DFIG due to wind gusts.

2. The comparison between the simulated and actual power curves shows that the trend is consistent, although there are still some noticeable errors during the simulation process.

The maximum errors between the simulated and tested power of the equivalent DFIG are shown in Table 6. It reveals that the maximum errors are less than 10% under wind gusts.

As discussed above, we have found that the accurate parameters of a wind farm can be determined using the data-driven approach. The correctness and feasibility of this method has been demonstrated through both theoretical and simulated results.

**CONCLUSION**

This paper proposes a data-driven approach to estimate the real-time equivalent parameters of a wind farm during wind gusts. The main contribution of this study is the aggregation of a wind farm with DFIGs into an equivalent generator. By using characteristic set analysis, analytical expressions for the parameters of the equivalent DFIG have been derived from the algebraic equations with variable coefficients. Due to our study, the derived

equivalent parameters of DFIG can accurately follow perturbations of the wind speed. The feasibility and validity of the proposed approach are illustrated with a 50 MW wind farm consisting of 34 DFIGs. This study provides an effective way for online suppression of the SSR in a real-life wind farm under wind gusts.

At the algorithm level, a data-driven procedure that is suitable for aggregating a wind farm with DFIGs has been developed. The main goal of this study has been to derive analytical solutions of the variable coefficient algebraic equations.

The procedure consists of the following steps: selecting characteristic set by modeling the irreducible chains → zero-decomposing by solving the polynomial rings → validating the correctness by analyzing pseudo-residual.

This method is suitable for obtaining analytical solutions of the online equivalent parameters of a wind farm. The accuracy and rapidity of this data-driven procedure has been verified through simulations of a wind farm using PSCAD software.

At the engineering level, in order to suppress the SSR in a wind farm during wind gusts, we have developed a data-driven approach based on constructing a modeling-solving-validating research framework. This paper provides a reference for the “abandonment of wind” caused by wind gusts. Moreover, this study can be applied to any wind farm that consists of DFIGs, based on making full use of sampled data.

## References

1. Yan Weihang, Shah Shahil, Gevorgjan V., Koralewicz P., Wallen R., Gao David Wenzhong. On the low risk of SSR in type III wind turbines operating with grid-forming control. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2024;15(1):443-453. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2023.3300219>.
2. Du Chengmao, Du Xiong, Tong Chenghui. SSR stable wind speed range quantification for DFIG-based wind power conversion system considering frequency coupling. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2023;14(1):125-139. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2022.3203317>.
3. Lin Siqi, Yao Wei, Xiong Yongxin, Shi Zhongtuo, Zhao Yifan, Ai Xiaomeng, et al. Three-stage dynamic equivalent modeling approach for wind farm using accurate crowbar status identification and voltage differences among wind turbines. *Electric Power Systems Research*. 2024;228:110091. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.110091>.
4. Yang Pengwei, Cao Yuqi, Tan Jie, Chen Junfa, Zhang Chao, Wang Yan, et al. Electric vehicle charging capacity of distribution network considering conventional load composition. *Energy Engineering*. 2023;120(3):743-762. <https://doi.org/10.32604/ee.2023.024128>.
5. Dong Xiaofeng, Jiang Qi, Lian Jijian, Miao Zhuo, Yu Tongshun, Zhou Huan. Optimized identification process of equivalent wind load calculations for offshore wind turbines under standstill conditions. *Ocean Engineering*. 2024;312(1):119043. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119043>.
6. Huang Jingwen, Du Zhiye, Cai Hongwei, He Jingxuan, Yue Guohua, Li Gen, et al. Probabilistic load flow calculation and power system security analysis based on improved CGC-CM. *Electric Power Systems Research*. 2024;237:110995. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110995>.
7. Niu Yunbo, Wang Jianzhou, Zhang Ziyuan, Yu Yannan, Liu Jingjiang. A combined interval prediction system based on fuzzy strategy and neural network for wind speed. *Applied Soft Computing*. 2024;155:111408. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111408>.
8. Wang Peng, Zhang Zhenyuan, Chen Chenxu, Huang Qi, Dai Ningyi, Lee Wei-Jen. Multistage parameter identification featured generic wind farm dynamic equivalent modeling. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2023;59(6):7475-7483. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3307656>.
9. Gupta A.P., Mitra A., Mohapatra A., Singh S.N. A multi-machine equivalent model of a wind farm considering LVRT characteristic and wake effect. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2022;13(3):1396-1407. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2022.3159307>.
10. Yang Shanghui, Deng Xiaowei, Yang Kun. Machine-learning-based wind farm optimization through layout design and yaw control. *Renewable Energy*. 2024;224:120161. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120161>.
11. Hou Xinxing, Hu Wenbo, Luo Maomao. Short-term wind farm cluster power point-interval prediction based on graph spatio-temporal features and S-stacking combined reconstruction. *Heliyon*. 2024;10(14):e33945. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33945>.
12. Tao Siyu, Feijóo-Lorenzo A.E. Multi-objective optimization of clustered wind farms based on potential game approach. *Ocean Engineering*. 2024;300:117291. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117291>.
13. Rahman M.T., Hasan K.N., Sokolowski P. Evaluation of wind farm aggregation using probabilistic clustering algorithms for power system stability assessment. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2022;30:100678. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100678>.
14. Ahmed S., Huang Yongyi, Tayyab Q., Senjyu T., Elkholly M.H. Identification of power grids low-frequency oscillations through a combined MEEMD-Prony method. *Energy Reports*. 2024;11:4245-4253. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.04.015>.
15. Feng Shuang, Cui Hao, Lei Jiaying, Yang Hao, Tang Yi. Data-driven time-frequency-domain equivalent modeling of wind farms for wideband oscillations analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2023;38(6):4465-4475. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2023.3321592>.
16. Xia Yurui, Wang Jianzhou, Zhang Ziyuan, Wei Danxiang, Cao Zhining, Li Zhiwu. A wind speed point-interval fuzzy forecasting system based on data decomposition and multi-objective optimizer. *Applied Soft Computing*. 2024;165:112084. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112084>.
17. Huang Liang, Wu Chao, Zhou Dao, Blaabjerg F. Two-port-network-based decoupled impedance modeling method of DFIG system and DC-link coupling analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2024;157:109878. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109878>.
18. Shi Xingyu, Cao Yijia, Li Yong, Ma Junjie, Shahidehpour M., Wu Xi, et al. Data-driven model-free adaptive damping control with unknown control direction for wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020;123:106213. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106213>.
19. Rajendran S., Jena D., Diaz M., Rodriguez J. Design of modified complementary terminal sliding mode controller for wind turbine at region II using a two-mass model. *Results in Engineering*. 2024;24:103026. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103026>.
20. El Jaadi M., Haidi T., Belfqih A., Farah M., Dialmy A. Optimizing wind farm layout for enhanced electricity extraction using a new hybrid PSO-ANN method. *Global Energy Interconnection*. 2024;7(3):254-269. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2024.06.006>.
21. Zhang Zuan, Liang Yanchang, Zhao Xiaowei. Adaptive inter-area power oscillation damping from offshore wind farm and MMC-HVDC using deep reinforcement learning. *Renewable Energy*. 2024;224(C):120164. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120164>.

22. Treesatayapun C. Data-driven fault-tolerant control with fuzzy-rules equivalent model for a class of unknown discrete-time MIMO systems and complex coupling. *Journal of Computational Science*. 2022;63(9):101827. <https://doi.org/10.1016/j.jocs2022.101827>.
23. Liu Zhijian, Luo Jun, Han Jiangbei, Yu Chengjun, Fang Qian, Li Pengcheng, Liu Chengxi. Characteristic analysis and mitigation strategy for SSCI in series-compensated DFIG-based wind farm controlled by a virtual synchronous generator. *ISA transactions*. 2024;150:92-106. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2024.05.021>.
24. Xiaoshan Gao, Chunming Yuan, Guilin Zhang. Ritt-Wu's characteristic set method for ordinary difference polynomial systems with arbitrary ordering. *Acta Mathematica Scientia*. 2009;29(4):1063-1080. [https://doi.org/10.1016/S0252-9602\(09\)60086-2](https://doi.org/10.1016/S0252-9602(09)60086-2).
25. Chertovskih R., Pogodaev N., Staritsyn M., Aguiar A.P. Optimal control of diffusion processes: infinite-order variational analysis and numerical solution. *IEEE Control Systems Letters*. 2024;8(1):1469-1474. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.01945>.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Jianhua Chen,**  
Postgraduate,  
School of Electrical Engineering and Automation,  
Harbin Institute of Technology,  
92 Xidazhi St., Harbin 150001, China  
[chenjianhua@stu.hit.edu.cn](mailto:chenjianhua@stu.hit.edu.cn)

**Цзяньхуа Чэнь,**  
аспирант,  
факультет электротехники и автоматизации,  
Харбинский технологический институт,  
150001, г. Харбин, ул. Сидачжи, 92, Китай  
[chenjianhua@stu.hit.edu.cn](mailto:chenjianhua@stu.hit.edu.cn)

**Liguo Wang,**  
Professor,  
School of Electrical Engineering and Automation,  
Harbin Institute of Technology,  
92 Xidazhi St., Harbin 150001, China  
✉ [wlg2001@hit.edu.cn](mailto:wlg2001@hit.edu.cn)

**Лиго Ван,**  
профессор,  
факультет электротехники и автоматизации,  
Харбинский технологический институт,  
150001, г. Харбин, ул. Сидачжи, 92, Китай  
✉ [wlg2001@hit.edu.cn](mailto:wlg2001@hit.edu.cn)

**Alena Dreglea,**  
Cand. Sci. (Phys-Math.), Associate Professor,  
Senior Researcher of the Research Department,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
[adreglea@istu.edu](mailto:adreglea@istu.edu)  
<https://orcid.org/0000-0002-5032-0665>

**Алена Дрегля,**  
к.ф.-м.н., доцент,  
старший научный сотрудник,  
научно-исследовательский отдел,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
[adreglea@istu.edu](mailto:adreglea@istu.edu)  
<https://orcid.org/0000-0002-5032-0665>

**Elena Chistyakova,**  
Cand. Sci. (Phys-Math.), Associate Professor,  
Senior Researcher of the Research Department,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
Research Fellow,  
Matrosov Institute for System Dynamics  
and Control Theory of Siberian Branch of  
Russian Academy of Sciences,  
134 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia  
[chistyak@istu.edu](mailto:chistyak@istu.edu)

**Елена Чистякова,**  
к.ф.-м.н., доцент,  
старший научный сотрудник,  
научно-исследовательский отдел,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
старший научный сотрудник,  
Институт динамики систем и теории управления  
им. В.Ф. Матросова СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия  
[chistyak@istu.edu](mailto:chistyak@istu.edu)

**Chunlai Yu,**  
Dr. Sci. (Eng.),  
Associate Professor,  
School of Marine Engineering,  
Dalian Maritime University,  
1 Linghai Road, Dalian 116026, China  
[hepri\\_yu@163.com](mailto:hepri_yu@163.com)

**Чуньлай Юй,**  
д.т.н.,  
доцент,  
Школа морской инженерии,  
Даляньский морской университет,  
116026, г. Далянь, ул. Линхай, 1, Китай  
[hepri\\_yu@163.com](mailto:hepri_yu@163.com)

**Authors' contribution**

The authors contributed equally to this article.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

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

**Information about the article**

The article was submitted 01.10.2024; approved after reviewing 31.10.2024; accepted for publication 25.11.2024.

**Заявленный 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 01.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 31.10.2024 г.; принята к публикации 25.11.2024 г.

## МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 621.365.2:669.2/8

EDN: KDYOXR

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-612-622



## Физическое моделирование процесса разделения двух несмешивающихся жидкостей в плавильном агрегате «Победа» при наличии локальной зоны барботажного перемешивания расплава боковыми и донными фурмами

К.В. Булатов<sup>1</sup>, В.П. Жуков<sup>2✉</sup>, В.А. Меньщиков<sup>3</sup>, Е.В. Братыгин<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Уральский научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия

**Резюме.** Цель – поиск физико-химических закономерностей процесса разделения жидких продуктов плавки при продувке расплава боковыми и донными фурмами, установленных в зоне загрузки и плавления медьсодержащей шихты агрегата «Победа». В работе принят метод физического моделирования с использованием прозрачных сред (растительное масло, окрашенная вода) и стеклянной кюветы. Динамическое подобие образца и модели обеспечивали постоянством критерия Архимеда  $Ar$ . Исходное соотношение уровней менее и более плотной жидкостей выбирали на основании критерия Вебера  $We$ . Величины критериев Архимеда на одну боковую и донную фурмы составляли 5;3 и 12;6 (варианты 1 и 2, соответственно). Полноту разделения фаз определяли визуально с помощью киносъёмки, фиксирующей появление границы раздела жидкостей и перемещение фронта отстаивания, а также количественно – методом отбора проб с последующим выделением воды и масла центрифугированием. Из условия  $Ar = idem$  рассчитаны параметры продувки на «холодной» модели с установкой 6 донных и 3 боковых фурм, места расположения которых принимали за барботажную зону ванны. Показано, что закономерности разделения фаз зависят от продолжительности и интенсивности ввода дутья. Продувка по варианту 1 характеризуется формированием в конце опыта постоянного профиля расслоения фаз, что происходит на ограниченном участке зоны отстаивания, находящегося вдали от области барботажа. При больших значениях Архимеда (вариант 2) жидкая ванна за меньшее время приобретает однородную структуру, и границ расслоения не наблюдается по всей длине ванны. Таким образом, разработана методология холодного моделирования, позволяющая исследовать закономерности разделения фаз при наличии отдельной зоны барботажа в жидкой ванне. Это позволяет в дальнейшем получить объективные характеристики по расположению фурм, режимам продувки, обеспечивающие снижение механических потерь меди со шлаками при заданной производительности плавки в агрегате «Победа».

**Ключевые слова:** разделение жидкостей, продувка, критерии подобия, барботажная зона, зона отстаивания

**Для цитирования:** Булатов К.В., Жуков В.П., Меньщиков В.А., Братыгин Е.В. Физическое моделирование процесса разделения двух несмешивающихся жидкостей в плавильном агрегате «Победа» при наличии локальной зоны барботажного перемешивания расплава боковыми и донными фурмами // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 612–622. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-612-622>. EDN: KDYOXR.

## METALLURGY

Original article

## Physical simulation of separating two immiscible liquids in the “Pobeda” smelting unit with localized melt sparging by means of side and basal tuyeres

Konstantin V. Bulatov<sup>1</sup>, Vladimir P. Zhukov<sup>2✉</sup>, Vikentiy A. Menshchikov<sup>3</sup>, Evgeniy V. Bratygin<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Uralmehanoobr OJSC, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** The paper aims to find physicochemical patterns in the separation of liquid smelting products with the melt blasted by side and basal tuyeres installed in the area of a “Pobeda” smelting unit intended for charging

and melting copper-containing charge. The study adopted the physical simulation method with the use of transparent media (vegetable oil and colored water) and a glass cuvette. The dynamic similarity between the sample and model was ensured by the constancy of the Archimedes number  $Ar$ . The initial ratio between the levels of less and more dense fluids was chosen according to the Weber number  $We$ . The Archimedes numbers per one side and one basal tuyere amounted to 5;3 and 12;6 (Variants 1 and 2, respectively). The completeness of phase separation was determined visually through filming the liquid-liquid interface emergence and the settlement front advance, as well as quantitatively via the sampling method with subsequent separation of water and oil through centrifugation. According to the condition  $Ar = idem$ , the blasting parameters were determined for the cold model with the installation of six basal and three side tuyeres, which were assumed to be located in the sparging zone of the melt. The phase separation patterns are shown to depend on the duration and intensity of the blast. Under Variant 1, blasting is characterized by the formation of a constant phase immiscibility profile at the end of the experiment, which occurs in a limited area of the settlement zone that is far from the sparging zone. At higher Archimedes numbers (Variant 2), the melt pool acquires a homogeneous structure in a shorter time, and no immiscibility boundaries are observed along the entire length of the melt. Thus, a cold modeling technique was developed to study the patterns of phase separation in the presence of a separate sparging zone in the melt pool. This provides a means to obtain objective parameters for the location of tuyeres and blasting conditions, thus ensuring a reduction in the mechanical losses of copper with slag at a given smelting capacity in the "Pobeda" unit.

**Keywords:** liquid separation, blowing, similarity criteria, bubbling zone, settling zone

**For citation:** Bulatov K.V., Zhukov V.P., Menshchikov V.A., Bratygin E.V. Physical simulation of separating two immiscible liquids in the "Pobeda" smelting unit with localized melt sparging by means of side and basal tuyeres. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):612-622. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-612-622>. EDN: KDYOXR.

## ВВЕДЕНИЕ

Разделение шлака и штейна является завершающей стадией общего физико-химического процесса образования жидких продуктов плавки конечного состава после формирования оксидно-сульфидных силикатных расплавов и первичного шлака. Более полное разделение жидких фаз снижает долю механических потерь металлов в шлаке и повышает извлечение меди в штейн.

Интенсивная продувка ванны в области загрузки плавильного агрегата «Победа» (ПАП) увеличивает производительность процесса за счет более высоких значений массового расхода кислорода и коэффициентов тепло-массопередачи, но при этом ухудшаются условия разделения фаз и повышается содержание меди в шлаке. Наличие в одном агрегате различных по назначению зон плавления и отстаивания предполагает поиск взаимосвязанных конструктивных и технологических решений по оптимизации размещения фурм, дутьевых параметров, обоснованного выбора размеров барботажной зоны (БЗ) и участка отстаивания расплава.

Количественные закономерности процесса самопроизвольного расслоения жидкостей описываются в законе Стокса, который применяется для условий неподвижной вязкой среды. Наличие конвективных потоков в расплаве, возникающих за счет продувки расплава, приводит к дроблению крупных и коалесценции мелких капель жидкости, что ускоряет их оседание в донную фазу. На

результатирующую скорость разделения влияет эффект флотации, когда капли выносятся на поверхность ванны газовыми пузырями. Кроме того, БЗ не является однородной и насыщается по мере продувки пузырьками газа, что (в зависимости от газосодержания) влияет на плотность и траекторию движения жидкости. По мере удаления от зоны продувки интенсивность циркуляционных потоков изменяется в объеме ванны по величине и направлению. Разделение фаз также осуществляется в БЗ, о чем свидетельствует опыт работы печей Ванюкова [1]. В этом случае аналитический прогноз полноты разделения расплава представляется сложной задачей и ограничивает возможности теоретических исследований. Известные методы численного моделирования и различные математические модели преимущественно описывают гидрогазодинамические процессы в барботируемой ванне и не касаются вопросов разделения фаз [2–8].

При рассмотрении такой задачи может быть использован метод физического моделирования, когда процесс расслаивания жидкостей воспроизводится на холодных моделях.

Целью настоящей работы являются разработка методологии и поиск закономерностей процесса разделения двухфазной жидкости в общей ванне ПАП, когда на ограниченном ее участке в зоне загрузки и плавления шихты осуществляется продувка расплава.

## ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ

Расчет физических моделей и обработку результатов холодного моделирования проводили на основе равенства критериев подобия, описывающих аналогию соответствующих физико-химических процессов. Для условий барботажного перемешивания жидкой ванны универсальным критерием динамического подобия выбран критерий Архимеда ( $Ar$ ) [9–15], который наиболее часто используется в форме модифицированного критерия  $Ar$  или  $Fr$  (критерий Фруда) для исследования процессов с донной продувкой [16–19]. Заметим, что в критерий  $Fr$  не входит диаметр сопла, а связывает модель с величиной его заглубления в жидкость, что оправдано при изучении параметров погруженных струй в условиях значительного гидростатического противодавления расплава. Когда объектом исследований является движение жидкости в реакционной зоне, возникающего за счет импульса струи, диаметр выходного отверстия играет существенную роль [20]. При комбинированной продувке боковыми фурмами (БФ) и донными фурмами (ДФ) отмечено заметное влияние на скорость циркуляции геометрических параметров боковой струи [15], зависящих от диаметра сопла [10], погруженного на меньшую глубину в ванну. С учетом изложенного, динамическое подобие в БЗ обеспечивали из соблюдения условия  $Ar = idem$ , а число Архимеда рассчитывали по формуле [9]:

$$Ar = \frac{\rho_r W_r}{g \rho_{ж} d} \quad (1)$$

где  $W_r$  – скорость истечения газа, м/с;  $\rho_r$  – плотность газа при истечении, кг/м<sup>3</sup>;  $d = d_c$  – диаметр центрального сопла, м (для кольцевого зазора при использовании ДФ с оболочкой принимали значение эффективного диаметра, равное  $d = d_s = (4F/3,14)^{0,5}$ , где  $F$  – площадь сопла, м<sup>2</sup>);  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения.

Входящую в уравнение (1) величину  $W_r$  для образца определяли с учетом сопротивления воздухоподводящего тракта ( $\varphi = 0,7$ ) и  $\rho_r$  по формулам [9]:

$$W_r = \varphi \sqrt{\frac{2gkP_0T_1}{(k-1)T_0\rho_0} \left[ 1 - \left( \frac{H'}{P'_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}; \quad (2)$$

$$\rho_r = \rho_0 \frac{T_0 P'_1}{T_1 P_0} \left( \frac{H'}{P'_1} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad (3)$$

где  $k = 1,40$  – показатель адиабаты;  $\rho_0 = 1,293$  кг/м<sup>3</sup> – плотность воздуха (1,428 кг/м<sup>3</sup> – кислорода) при нормальных условиях;  $T_0 = 273$  К – абсолютная температура;  $T_1 = 973$  К – средняя температура факела, принятая как  $(T_6 - T_A)/2$ ;  $T_6 = 1773$  К – балансовая температура факела;  $T_A = 373$  К – температура дутья;  $P_0 = 10332$  кг/м<sup>2</sup> – атмосферное давление;  $P'_1$  – абсолютное давление истечения, кг/м<sup>2</sup>;  $H'$  – абсолютное значение гидростатического давления слоя расплава, кг/м<sup>2</sup>.

Выбор критериев подобия для процесса разделения фаз осуществляли на основе анализа физико-химических величин, входящих в уравнение Стокса с поправками Адамара-Рабчинского [20]:

$$\vartheta = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_1 - \rho_2) \cdot r^2 g}{\eta_2} \cdot \frac{3(\eta_1 + \eta_2)}{3\eta_1 + 2\eta_2}, \quad (4)$$

где  $\vartheta$  – скорость осаждения капли, м/с, радиусом  $r$ , м;  $\rho_1, \rho_2$  – плотность более и менее плотных жидкостей, соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta_1, \eta_2$  – коэффициент динамической вязкости более и менее плотных фаз, Па·с;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

Из уравнения (4) следует, что величина  $\vartheta$  зависит от градиента плотности ( $\rho_1 - \rho_2$ ) и коэффициентов динамической вязкости  $\eta_1, \eta_2$ . Задавая отношение ( $\rho_1 - \rho_2$ ) к  $\rho_1$ , получим выражение  $1 - \rho_2/\rho_1$  и симплекс ( $\rho_2/\rho_1$ ), учитывающий плотность различных фаз. Подобие вязкостных сил по аналогии соблюдали симплексом  $\eta_2/\eta_1$ .

К числу факторов, влияющих на разделение расплава, относится поверхностное натяжение<sup>5</sup> [21], значение которого  $\sigma$  находится во взаимосвязи величин плотности  $\rho_{ж}$  жидкости с линейным параметром  $b_i$ , согласно критерию Вебера ( $We$ ) [22]:

$$We = \frac{\rho_{ж} g b_i^2}{\sigma} \quad (5)$$

При исследовании процессов отстаивания в качестве характерного линейного параметра

<sup>5</sup>Ванюков А.В., Зайцев В.Я. Теория пирометаллургических процессов: учеб. пособ. М.: Металлургия, 1993. 384 с.

целесообразно принять отношение высот слоя шлака и штейна, которое одновременно может являться геометрической безразмерной характеристикой полноты расслаивания фаз в вертикальной плоскости ванны. Тогда при *Weidem* линейные величины образца ПАП и модели должны соответствовать условию:

$$\frac{H_{\text{шл}}^{\text{обр}}}{h_{\text{шл}}^{\text{мод}}} = \left( \frac{\rho_{\text{шл}}^{\text{мод}}}{\rho_{\text{шл}}^{\text{обр}}} \cdot \frac{\sigma_{\text{шл}}^{\text{обр}}}{\sigma_{\text{шл}}^{\text{мод}}} \right)^{0,5}; \quad (6)$$

$$\frac{H_{\text{шт}}^{\text{обр}}}{h_{\text{шт}}^{\text{мод}}} = \left( \frac{\rho_{\text{шт}}^{\text{мод}}}{\rho_{\text{шт}}^{\text{обр}}} \cdot \frac{\sigma_{\text{шт}}^{\text{обр}}}{\sigma_{\text{шт}}^{\text{мод}}} \right)^{0,5}, \quad (7)$$

комбинируя которые, получим уравнение для выбора соотношения высот модельных жидкостей.

$$\left( \frac{h_2}{h_1} \right)^{\text{мод}} = \left( \frac{H_{\text{шл}}}{H_{\text{шт}}} \right)^{\text{обр}} \cdot \left[ \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{\text{мод}} \cdot \left( \frac{\sigma_{\text{шт}}}{\sigma_{\text{шл}}} \right)^{\text{обр}} \cdot \left( \frac{\rho_{\text{шл}}}{\rho_{\text{шт}}} \right)^{\text{обр}} \cdot \left( \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^{\text{мод}} \right]^{0,5} \quad (8)$$

Физико-химические свойства расплавов, жидкостей, принятые на основе литературных данных, расчетные значения симплексов подобия приведены в таблице. Из данных таблицы следует, что наиболее подходящей модельной жидкостью для шлака является масло. Некоторое расхождение симплексов плотности

и поверхностного натяжения нивелируется линейным параметром критерия *We*.

**Методика эксперимента.** Опыты проводили в прозрачной кювете с размерами 120x240x150 мм, в которой установлены 6ДФ и 3БФ с диаметром сопл 3 мм. Для устранения застойных зон в области ДФ, обнаруженных вследствие особенностей крепления ДФ, дополнительно предусмотрено «фальшдно», выравнивающее поверхность пода на уровне сопл. Схема измерительных приборов и система подачи дутья аналогична ранее использованной при моделировании продувке однофазной жидкости [14] и модельного комплекса по исследованию барботажных процессов. Внешний вид кюветы с модельными жидкостями показан на рис. 1 а.

Подставляя численные значения симплексов таблицы в уравнение (8), получено соотношение высот модельных жидкостей  $(h_2/h_1) = 1,46$ . В качестве примера для расчета симплекса  $H_{\text{шл}}/H_{\text{шт}}$  принят средний уровень шлака 0,7 и штейна 0,3 м. При геометрическом масштабе моделирования общей высоты ванны 1:10 в кювету заливали модельные жидкости, обеспечивающие исходную высоту слоя масла 60 мм и водного раствора 40 мм, что соответствует  $k = 1,5$ .

Продувку модельной ванны осуществляли с расходом воздуха на одну БФ 4; 7 дм<sup>3</sup>/мин, что соответствует величинам  $Ar$  (БФ) = 5; 12

Физико-химические свойства расплавов, основные симплексы подобия образца и моделирующих жидкостей<sup>5</sup> [19, 20, 22]

Physico-chemical properties of melts, basic similarity simplices of the sample and modeling liquids<sup>5</sup> [19, 20, 22]

Объект	Фаза	Жидкость	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\eta$ , Па·с	$\sigma$ , Н/м	$\frac{\rho_{\text{шл}}}{\rho_{\text{шт}}}$	$\frac{\eta_{\text{шл}}}{\eta_{\text{шт}}}$	$\frac{\sigma_{\text{шт}}}{\sigma_{\text{шл}}}$	$\frac{H_{\text{шл}}}{H_{\text{шт}}}$
Образец	штейн	штейн (40–60% Cu), 1250–1350°C	5000–5500	0,01 (ср)	0,30 (ср)	0,65 (ср)	50	1,06	2,33
	шлак	шлак (25% SiO <sub>2</sub> ), 1250°C	3400	0,5	0,33	-	-	-	-
Модель	штейн	вода (25°C)	1000	0,001	0,073	1,15	55	0,50	-
	шлак	растительное масло (25°C)	868*	0,055*	0,036	-	-	-	-

\* определена экспериментально.

и подаче газа на одну ДФ 3; 5 дм<sup>3</sup>/мин при  $Ar(ДФ) = 3$ ; 6. Параметры дутья обусловлены возможностью контроля за границей раздела фаз, т.к. предварительными экспериментами было показано, что при  $Ar(БФ) \geq 12$  двухфазная жидкость практически мгновенно насыщается пузырьками воздуха и границу раздела визуализировать сложно. Поэтому опыты проводили при  $Ar_{БФ} = 5$  и  $Ar_{ДФ} = 6$ .

Пробы 3-фазной жидкости, содержащей воду и масло с пузырьками воздуха, периодически отбирали с помощью шприца. Точки отбора проб располагались посередине высоты слоя жидкости и вблизи торцевых стенок кюветы в БЗ и зоне отстаивания (ЗО).

Места отбора проб находились по центральной продольной оси ( $x$ ) ванны. Сепарацию жидкостей с воздухом осуществляли центрифугированием, по завершении которого измеряли объем разделенных жидких фаз  $V_2$  и  $V_1$  и рассчитывали отношение  $h_2/h_1$ . Объем газа в пробах изменялся в интервале 0,2–2,1 мл.

Гидродинамическую обстановку продувки и динамику состояния общей ванны контролировали с помощью кинокамеры со скоростью 30 кадр/с. Полученные видеотреки анализировали и наиболее характерные моменты съемки фиксировали в виде отдельных фотографий (рис. 1).

Результаты измерений представляли в форме безразмерной величины  $\theta_i = (h_2/h_1)_i$ , зависящей от условий продувки ( $Ar_{БФ}$ ,  $Ar_{ДФ}$ ) и отстаивания ( $\tau_i$ ,  $x$ ), где  $(h_2/h_1)_i$  или  $(V_2/V_1)_o$  – отношение уровней (объема) масла и воды в пробе, отобранной за время  $\tau_i$  по ходу опыта;  $x$  – линейная координата. Степень разделения фаз ( $\eta_i$ ) количественно оценивали по формуле  $\eta_i = \theta_i/k$ , которая косвенно может также являться безразмерной характеристикой эффективности перемешивания. За величину  $k$  принимали исходное отношение  $(h_2/h_1)_o = 1,5$  до начала продувки жидкости.

### АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На рис. 1 – фотографии, иллюстрирующие состояние ванны на различных этапах холодного моделирования при величинах  $Ar(БФ) = 5$  и  $Ar(ДФ) = 3$ . Из рис. 1 *b* видно, что после включения дутья на фурмы практически мгновенно образуется барботажный 3-фазный слой, состоящий из насыщенных в  $Ж_2$  и  $Ж_1$  мелких пузырьков воздуха. В го-

ризонтальной и вертикальной плоскостях во всем объеме БЗ формируются контуры циркуляции, куда вовлекаются из ЗО насыщенные газом массивы  $Ж_2$  и  $Ж_1$ . В дальнейшем барботажный слой быстро ( $\Delta t = 3$  с) смещается от мест установки фурм (рис. 1 *c*), образуя переменную границу контактирующих с барботажным слоем элементов  $Ж_2$  и  $Ж_1$ , которая более отчетливо проявляется на 35 с эксперимента (рис. 1 *d*). По мере дальнейшего увеличения  $\tau_i$  горизонтальный раздел фаз, по сравнению с исходным состоянием ванны (рис. 1 *a*), становится более «размытым» (рис. 1 *c*, *d*), область ЗО сужается, и на завершающем этапе опыта большую часть ванны занимает сравнительно однородный слой смеси жидкостей с газом (рис. 1 *e*, *f*) и установившимся профилем расслаивания.

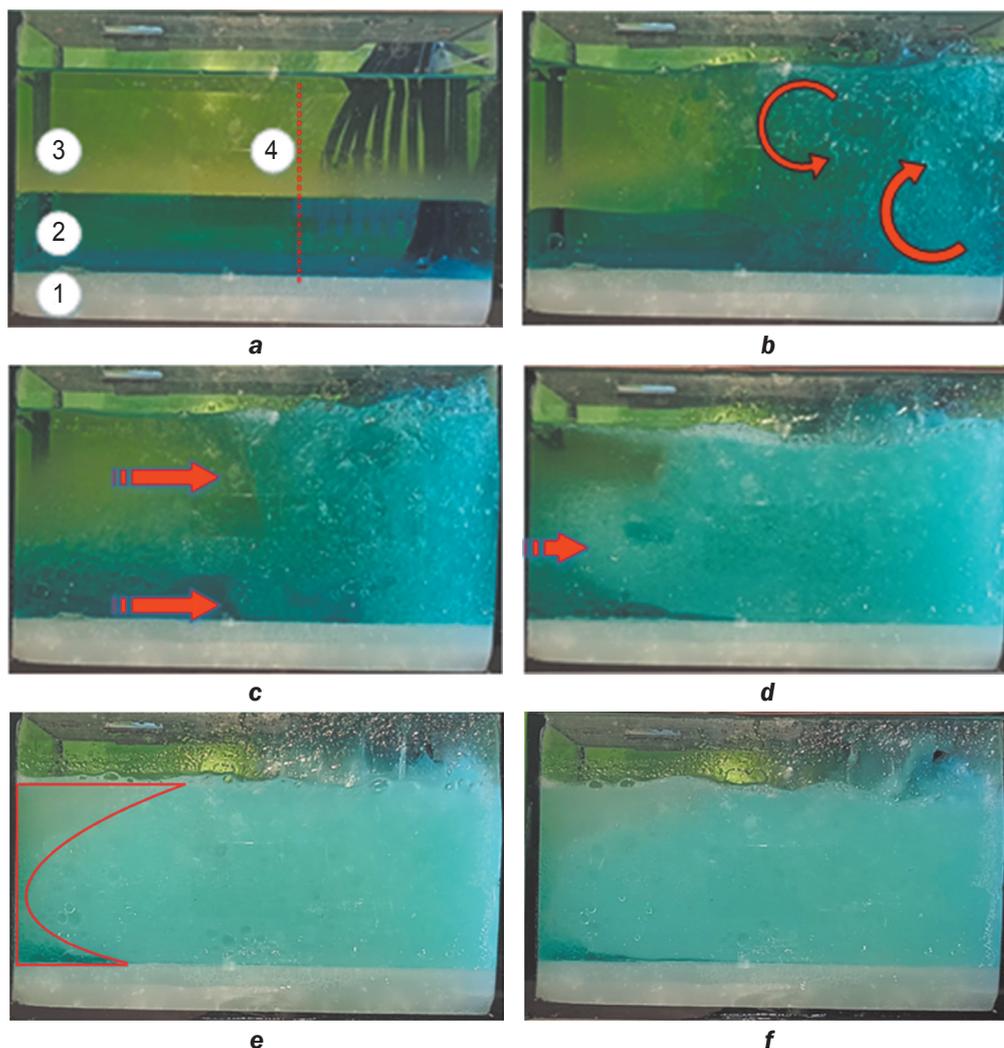
На рис. 2–5 представлены результаты математической обработки экспериментальных данных, полученных на основе анализа сепарированных проб жидкой ванны (ЖВ), отобранных в области барботажа и отстаивания по ходу эксперимента.

Из данных рис. 2 следует, что зависимость объема  $V_1$  и  $V_2$  от продолжительности продувки в БЗ имеет экстремальный характер, который в наибольшей степени проявляется для модельной жидкости  $Ж_1$ . Поэтому вполне закономерно, что кривые функций  $\theta_i(\tau_i)$  и  $\eta_i(\tau_i)$  обнаруживают максимум при  $\tau_i = 150$  с на рис. 3, где представлена зависимость от времени.

Вид функций и качественная картина разделения фаз могут быть пояснены на основе принятых в работе значений безразмерных величин. Из определения  $\theta_i$  следует, что на момент времени  $\tau_k$  в точке отбора проб может достигаться некое предельное значение функции  $\theta_i(\tau_i) = k = (h_2/h_1)_o = 1,5$  или

$$\lim_{\tau_i \rightarrow \tau_k} \theta_i(\tau_i) = k, \quad (9)$$

когда в ЖВ кюветы (до центрифугирования пробы) содержатся  $Ж_2$  и  $Ж_1$  в объемах, соответствующих исходному соотношению фаз. Поэтому изменение  $\theta_i(\tau_i)$  от величины  $k$  может количественно свидетельствовать о полноте разделения и эффективности перемешивания. Для удобства интерпретации экспериментальных данных введен безразмерный параметр  $\eta_i = \theta_i(\tau_i)/k$ , показывающий степень отклонения от начального состояния

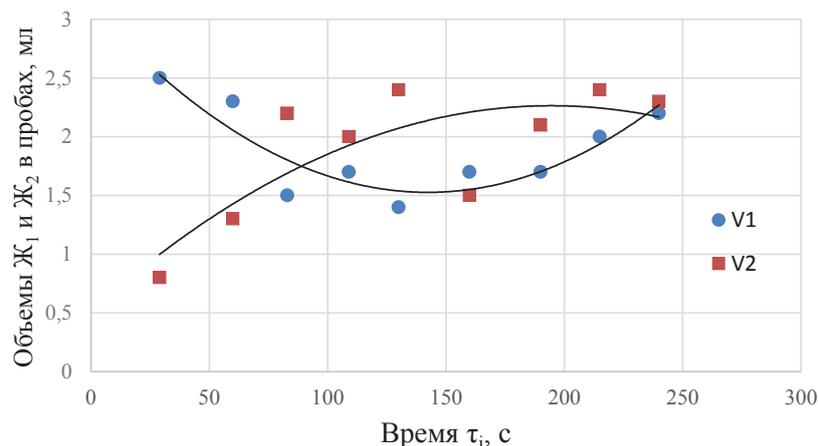


**Рис. 1.** Изображение ванны на разных этапах холодного моделирования: а – исходное состояние до продувки, где 1 – фальшдно, 2 – Ж<sub>1</sub>, 3 – Ж<sub>2</sub>, 4 – граница боковой и донной фурм; б – начало продувки и появление барботажного слоя с пузырьками газа (массив чередующихся светлых точек), где характер циркуляционных потоков  $\tau_i = 3$  с; в – формирование БЗ, где границы раздела фаз  $\tau_i = 6$  с; д – распространение БЗ, где граница раздела фаз  $\tau_i = 35$  с; е, ф – установившейся режим с профилем зоны отстаивания (е – профиль отстойной зоны  $\tau_i = 150$  с; ф – профиль отстойной зоны  $\tau_i = 240$  с)

**Fig. 1.** Bath image at different stages of cold modeling: а – initial state before blowing, where 1 – false bottom, 2 – liquid Ж<sub>1</sub>, 3 – liquid Ж<sub>2</sub>, 4 – boundary of the side and bottom lances; б – beginning of blowing and appearance of a bubbling layer with gas bubbles (an array of alternating light dots), where the nature of the circulation flows is  $\tau_i = 3$  s; в – БЗ formation, where the phase boundaries are  $\tau_i = 6$  s; д – БЗ propagation, where the phase boundary is  $\tau_i = 35$  s; е, ф – steady-state mode with a settling zone profile (е – settling zone profile is  $\tau_i = 150$  s; ф – settling zone profile is  $\tau_i = 240$  s)

жидкостей. Значения  $\eta_i < 1,0$  указывают на недостаточное перемешивание фаз, и в ЖВ содержатся еще в разных объемах исходные элементы Ж<sub>2</sub> и Ж<sub>1</sub>, или говорят о начале расслоения с выстраиванием эмпирического соотношения высот согласно  $\theta_i(\tau_i)$ . При  $\eta_i = 1$  и  $\theta_i(\tau_i) = k$  разделения фаз не происходит, и можно предполагать, что гетерогенная система «Ж<sub>1</sub>-Ж<sub>2</sub>-газ» достаточно переме-

шана. Первоначально в жидкой ванне БЗ наблюдаются наименьшие значения  $\theta_i$ ,  $\eta_i$ , но по мере увеличения продолжительности опыта последние возрастают, достигая максимума 1,4 и 0,9 при  $\tau_i \approx 150$  с соответственно. Необходимо отметить, что наибольшие значения  $\theta_i = 1,4$  и  $\eta_i = 0,9$  близки к аналогичным параметрам исходного состояния (1,5; 1,0). Восходящий характер кривых мо-



**Рис. 2.** Влияние продолжительности продувки на величину объемов разделенных фаз в барботажной зоне:

$V_1$  – более плотная и менее вязкая  $Ж_1$  (вода);  $V_2$  – менее плотная и более вязкая  $Ж_2$  (масло)

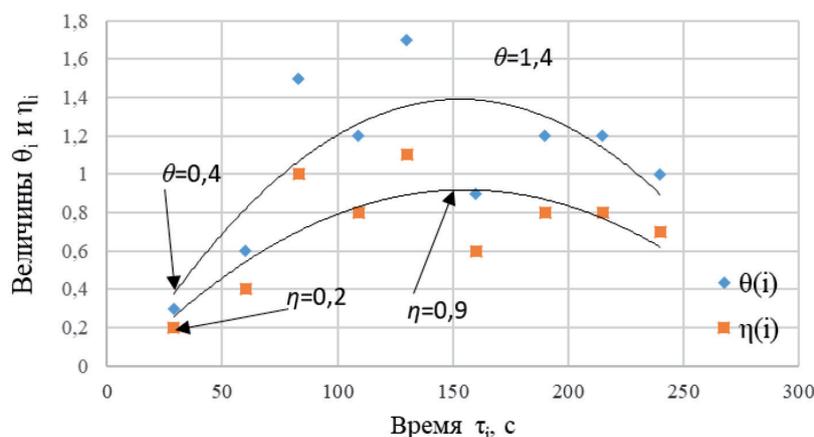
**Fig. 2.** Blowing duration vs volume of separated phases in the bubbling zone:  $V_1$  – denser and less viscous liquid  $Ж_1$  (water);  $V_2$  – less dense and more viscous liquid  $Ж_2$  (oil)

жет объясняться продвижением фронта барботажного слоя и постепенным вовлечением в перемешивание жидкостей 30 (рис. 1 b–d). В этот период разделение фаз визуально не отмечается.

На завершающем этапе моделирования после достижения точки экстремума величин  $\theta_i$  и  $\eta_i$  в интервале  $150 < \tau_i < 240$  с значения функций убывают:  $\theta_i$  с 1,5 до 0,9;  $\eta_i$  с 0,9 до 0,6. Из общей картины БЗ (рис. 1 d, e) видно, что в данный период времени структура барботажного слоя практически не изменяется, становится более однородной по сравнению с фрагментами рис. 1 b–d. В этом случае достигается сравнительно предельное насыщение жидкостей пузырьками воздуха, соответственно, снижается их роль в перемешивании ЖВ и создаются более благоприятные условия для разделения фаз, которые ме-

тодом визуализации заметить сложно. Различная газонасыщенность жидкости влияет также на величины плотности  $\rho_{ж}$  и критерия  $Ar$ , что изменяет гидродинамическую обстановку в окрестности струй. Вместе с тем нисходящий вид кривых, характерный после достижения точки экстремума, вероятнее всего, объясняется началом процесса расщепления фаз, что может являться предметом дальнейших исследований.

Количественную взаимосвязь между состоянием ванны в БЗ и 30 на основе безразмерных величин  $\theta_i$  и  $\eta_i$ , можно установить на основе анализа данных рис. 4 и рис. 3. В частности, видно, что отклонение максимальных и минимальных значений линий тренда для параметров  $\theta_i$ ,  $\eta_i$  в 30 составляет  $\Delta\theta = 0,3$  и  $\Delta\eta = 0,2$  (рис. 4), а в БЗ изменяются в большей степени:  $\Delta\theta = 1,0$



**Рис. 3.** Зависимость безразмерных параметров  $\theta_i$  и  $\eta_i$  от текущего времени продувки  $\tau_i$  в барботажной зоне

**Fig. 3.** Dimensionless parameters  $\theta_i$  and  $\eta_i$  vs current blowing time  $\tau_i$  in the bubbling zone

и  $\Delta\eta = 0,7$  (рис. 3). Причем в 30 значения  $\theta \rightarrow 1,5$ , а  $\eta \rightarrow 1,0$  на всем протяжении эксперимента (рис. 4), в то время как в БЗ отмеченная закономерность проявляется на ограниченном участке кривых, в области экстремума функций (рис. 3). Результаты вышеприведенного анализа фотографий рис. 1. подтверждают количественную оценку состояния ЖВ в 30. В целом можно сформулировать вывод об относительно слабом влиянии продувки на процессы перемешивания и разделения фаз в 30 при  $Ar$  (БФ) = 5 и  $Ar$  (ДФ) = 3.

Более интенсивное перемешивание ЖВ при числах  $Ar$  (БФ) = 12 и  $Ar$  (ДФ) = 6 показало, что уже на 35 с продувки образуется однородная ванна без признаков расслоения

фаз и наличия пузырьков воздуха (рис. 5). Разная оптическая плотность ЖВ на фото, в отличие от предыдущих фрагментов, обусловлена дополнительной боковой подсветкой кюветы с целью повышения качества визуализации структуры жидкостей.

Анализ проб, отобранных в местах ЖВ, аналогичных предыдущим опытам, свидетельствует об эффективном перемешивании жидкостей во всем объеме жидкой ванны, и средние величины  $\theta_i$  и  $\eta_i$  при этом составляли 1,4 и 0,9 соответственно. В этой связи представляется целесообразным проведение исследований по холодному моделированию на более крупной лабораторной установке с большей длиной реактора и жидкой ванны.

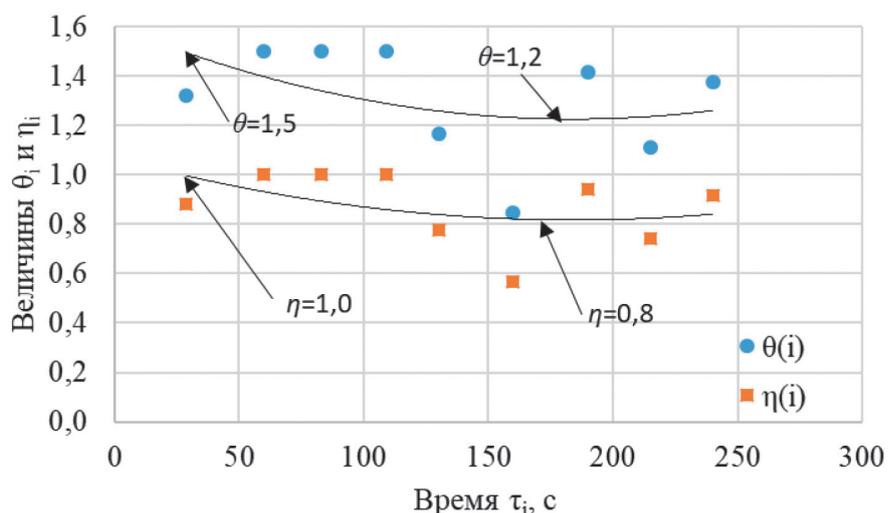


Рис. 4. Зависимость безразмерных критериев  $\theta_i$  и  $\eta_i$  от текущего времени продувки  $\tau_i$  в зоне отстаивания  
 Fig. 4. Dimensionless parameters  $\theta_i$  and  $\eta_i$  vs current blowing time  $\tau_i$  in the settling zone

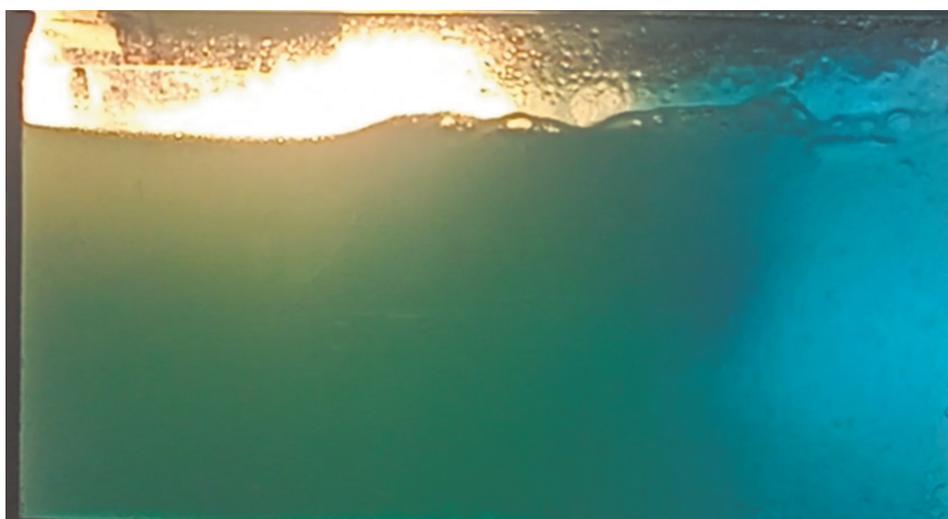


Рис. 5. Общий вид жидкой ванны при числах  $Ar$  (БФ) = 12 и  $Ar$  (ДФ) = 6 на 35 с продувки  
 Fig. 5. General view of the liquid bath at the numbers  $Ar$  (БФ) = 12 and  $Ar$  (ДФ) = 6 at 35 s after blowing

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методология физического моделирования процесса разделения жидких фаз шлака и штейна в условиях продувки ЖВ боковыми и донными фурмами применительно к условиям работы плавильного агрегата «Победа». Показано, что на основе критериев подобия  $Ar$ ,  $We$ , симплексов  $\rho_2/\rho_1$ ,  $\eta_2/\eta_1$ ,  $\sigma_2/\sigma_1$  и безразмерных параметров функций  $\theta_i(\tau_i, x)$  и  $\eta_i(\theta_i)$  представляется возможным на холодных моделях исследовать основные закономерности смешения и разделения механической смеси жидкостей  $J_2$ ,  $J_1$ .

Результаты выполненных исследований показали, что барботажное перемешивание жидкой ванны при  $Ar$  (БФ) = 5 и  $Ar$  (ДФ) = 3 приводит к формированию постоянного профиля расслаивания фаз на ограниченном участке отстойной зоны общей жидкой ванны. Наблюдается зависимость структуры

ЖВ от продолжительности дутья. Более интенсивный ввод газа с числами  $Ar$  (БФ) = 12 и  $Ar$  (ДФ) = 6 создает практически однородную смесь жидкостей без расслаивания за меньшее время продувки. В данном случае отсутствуют благоприятные условия для разделения фаз по длине ЖВ и представляется целесообразным проведение экспериментов по холодному моделированию на более крупной лабораторной установке.

Выводом, имеющим практическое значение, является установленная взаимосвязь между состоянием жидкой ванны в местах установки БФ и ДФ и за пределами БЗ, полученная в зависимости от времени и интенсивности продувки. Это создает предпосылки для объективного выбора условий ввода дутья, режимов технологических операций непрерывной плавки, обеспечивающих повышение извлечения меди в штейн при заданной производительности.

## Список источников

1. Быстров В.П. Процесс Ванюкова и печь Ванюкова // Известия вузов. Цветная металлургия. 1999. № 1. С. 7–12.
2. Li Ming-zhou, Zhou Jie-min, Tong Chang-ren, Zhang Wen-hai, Li He-song. Mathematical model of whole-process calculation for bottom-blowing copper smelting // Metallurgical Research & Technology. 2018. Vol. 115. No. 1. P. 107. <https://doi.org/10.1051/metal/2017078>.
3. Shao Pin, Jiang Lepeng. Flow and mixing behavior in a new bottom blown copper smelting furnace // International Journal of Molecular Sciences. 2019. Vol. 20. Iss. 22. P. 5757. <https://doi.org/10.3390/ijms20225757>.
4. Zhenyang Zhang, Zhuo Chen, Hongjie Yan, Fangkan Liu, Liu Liu, Zhixiang Cui, et al. Numerical simulation of gas-liquid multi-phase flows in oxygen enriched bottom-blown furnace // The Chinese Journal of Nonferrous Metals. 2012. Vol. 22. Iss. 6. P. 1826–1834.
5. Hongjie Yan, Fangkan Liu, Zhenyang Zhang, Qiang Gao, Liu Liu, Zhixiang Cui, et al. Influence of lance arrangement on bottom-blowing bath smelting process // The Chinese Journal of Nonferrous Metals. 2012. Vol. 22. Iss. 8. P. 2393–2400.
6. Shui Lang, Cui Zhixiang, Ma Xiaodong, Rhamdhani M.A., Nguyen Anh V., Zhao Baojun. Understanding of bath surface wave in bottom blown copper smelting furnace // Metallurgical and Materials Transactions B. 2016. Vol. 47. P. 135–144. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0466-z>.
7. Jiang Xu, Cui Zhixiang, Chen Mao, Zhao Baojun. Mixing behaviors in the horizontal bath smelting furnaces // Metallurgical and Materials Transactions B. 2018. Vol. 50. Iss. 4. P. 173–180. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1433-2>.
8. Jiang Xu, Cui Zhixiang, Chen Mao, Zhao Baojun. Study of plume eye in the copper bottom blown smelting furnace // Metallurgical and Materials Transactions B. 2019. Vol. 50. P. 782–789. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01516-0>.
9. Сборщиков Г.С., Володин А.М., Валавин В.С. Свободная конвекция расплава в печи с барботажным слоем при его продувке через боковую фурму, установленную под уровнем слоя // Известия вузов. Цветная металлургия. 2015. № 2. С. 58–68. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2015-2-58-68>. EDN: TRKZAN.
10. Шалыгин Л.М. Конвертерный передел в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1965. 160 с.
11. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. М.: Металлургия, 1974. 495 с.
12. Гречко А.В., Нестеренко Р.Д., Кудинов Ю.А. Практика физического моделирования на металлургическом заводе. М.: Металлургия, 1976. 224 с.
13. Мечев В.В., Быстров В.П., Тарасов А.В., Гречко А.В., Мазурчук Э.Н. Автогенные процессы в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1991. 413 с.
14. Булатов К.В., Жуков В.П., Братыгин Е.В., Томилов Н.А., Меньщиков В.А. Исследование физических явлений в барботажной зоне плавильного агрегата «Победа» методом холодного моделирования. Сообщение 1. Исследование гидродинамических закономерностей продувки жидкости газом с помощью боковой фурмы в защитной газовой оболочке // Известия вузов. Цветная металлургия. 2021. Т. 27. № 3. С. 15–23. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2021-3-15-23>. EDN: MBZBSU.
15. Баласанов А.В., Лехерзак В.Е., Роменец В.А., Усачев А.Б. Газификация угля в шлаковом расплаве. М.: Сталь-проект, 2008. 288 с.

16. Булатов К.В., Жуков В.П., Братыгин Е.В., Томилов Н.А., Меньщиков В.А. Исследование физических явлений в барботажной зоне плавильного агрегата «Победа» методом холодного моделирования Сообщение 3. Гидрогазодинамика комбинированной продувки жидкости газом с помощью донной и боковой фурм // Известия вузов. Цветная металлургия. 2023. № 1. С. 26–38. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-1-26-38>. EDN: XQKNJE.
17. Shui Lang, Cui Zhixiang, Ma Xiaodong, Jiang Xu, Chen Mao, Xiang Yong, et al. A water model study on mixing behavior of the two-layered bath in bottom-blown copper smelting furnace // JOM. 2018. Vol. 70. Iss. 10. P. 2065–2070. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-2879-z>.
18. Shui Lang, Cui Zhixiang, Ma Xiaodong, Rhamdhani M.A., Nguyen Anh, Zhao Baojun. Mixing phenomena in a bottom blown copper smelter: a water model study // Metallurgical and Materials Transactions B. 2015. Vol. 46. P. 1218–1225. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0324-z>.
19. Gajjar P., Haas T., Owusu K.B., Eickhoff M., Kowitwarangkul P., Pfeifer H. Physical study of the impact of injector design on mixing, convection and turbulence in ladle metallurgy // Engineering Science and Technology. 2019. Vol. 22. P. 538–547. <https://doi.org/10.1016/J.JESTCH.2018.11.010>.
20. Сурин В.А., Назаров Ю.Н. Массо- и теплообмен, гидрогазодинамика металлургической ванны. М.: Металлургия, 1993. 352 с.
21. Попель С.И. Поверхностные явления в расплавах: монография. М.: Металлургия, 1994. 432 с.
22. Марков Б.Л. Методы продувки мартеновской ванны. М.: Металлургия, 1975. 279 с.

### References

1. Bystrov V.P. Vanyukov process and Vanyukov furnace. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 1999;1:7-12. (In Russ.).
2. Li Ming-zhou, Zhou Jie-min, Tong Chang-ren, Zhang Wen-hai, Li He-song. Mathematical model of whole-process calculation for bottom-blowing copper smelting. *Metallurgical Research & Technology*. 2018;115(1):107. <https://doi.org/10.1051/etal/2017078>.
3. Shao Pin, Jiang Lepeng. Flow and mixing behavior in a new bottom blown copper smelting furnace. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019;20(22):5757. <https://doi.org/10.3390/ijms20225757>.
4. Zhenyang Zhang, Zhuo Chen, Hongjie Yan, Fangkan Liu, Liu Liu, Zhixiang Cui, et al. Numerical simulation of gas-liquid multi-phase flows in oxygen enriched bottom-blown furnace. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*. 2012;22(6):1826-1834.
5. Hongjie Yan, Fangkan Liu, Zhenyang Zhang, Qiang Gao, Liu Liu, Zhixiang Cui, et al. Influence of lance arrangement on bottom-blowing bath smelting process. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*. 2012;22(8):2393-2400.
6. Shui Lang, Cui Zhixiang, Ma Xiaodong, Rhamdhani M.A., Nguyen Anh V., Zhao Baojun. Understanding of bath surface wave in bottom blown copper smelting furnace. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016;47:135-144. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0466-z>.
7. Jiang Xu, Cui Zhixiang, Chen Mao, Zhao Baojun. Mixing behaviors in the horizontal bath smelting furnaces. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2018;50(4):173-180. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1433-2>.
8. Jiang Xu, Cui Zhixiang, Chen Mao, Zhao Baojun. Study of plume eye in the copper bottom blown smelting furnace. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2019;50:782-789. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01516-0>.
9. Sborshchikov G.S., Volodin A.M., Valavin V.S. Free convection of the melt in the furnace with a bubble layer during its blowing through a side tuyere established under the layer level. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2015;2:58-68. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2015-2-58-68>. EDN: TRKZAN.
10. Shalygin L.M. *Converter reprocessing in non-ferrous metallurgy*. Moscow: Metallurgiya; 1965, 160 p. (In Russ.).
11. Yavojskij V.I., Dorofeev G.A., Povh I.L. *Theory of steel bath blowing*. Moscow: Metallurgiya; 1974, 495 p. (In Russ.).
12. Grechko A.V., Nesterenko R.D., Kudinov Yu.A. *Practice of physical modeling at a metallurgical plant*. Moscow: Metallurgiya; 1976. 224 p. (In Russ.).
13. Mechev V.V., Bystrov V.P., Tarasov A.V., Grechko A.V., Mazurchuk E.N. *Autogenous processes in non-ferrous metallurgy*. Moscow: Metallurgiya; 1991, 413 p. (In Russ.).
14. Bulatov K.V., Zhukov V.P., Bratygin E.V., Tomilov N.A., Menshchikov V.A. Investigation of Pobeda furnace bubbling zone physics using cold modeling method. Message 1. Investigation of fluid and gas dynamics of bubbling using a side-blowing gas-protected lance. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2021;27(3):15-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2021-3-15-23>. EDN: MBZBSU.
15. Balasanov A.V., Lekherzak V.E., Romenec V.A., Usachev A.B. *Coal gasification in slag melt*. Moscow: Stal'proekt; 2008, 288 p. (In Russ.).
16. Bulatov K.V., Zhukov V.P., Bratygin E.V., Tomilov N.A., Menshchikov V.A. Investigation of Pobeda furnace bubbling zone physics using cold modeling method Part 3. The hydro-gas dynamics of combined blowing of liquid by gas using bottom and lateral lances. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;1:26-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-1-26-38>. EDN: XQKNJE.
17. Shui Lang, Cui Zhixiang, Ma Xiaodong, Jiang Xu, Chen Mao, Xiang Yong, et al. A water model study on mixing behavior of the two-layered bath in bottom-blown copper smelting furnace. *JOM*. 2018;70(10):2065-2070. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-2879-z>.

18. Shui Lang, Cui Zhixiang, Ma Xiaodong, Rhamdhani M.A., Nguyen Anh, Zhao Baojun. Mixing phenomena in a bottom blown copper smelter: a water model study. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2015;46:1218-1225. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0324-z>.
19. Gajjar P., Haas T., Owusu K.B., Eickhoff M., Kowitzarangkul P., Pfeifer H. Physical study of the impact of injector design on mixing, convection and turbulence in ladle metallurgy. *Engineering Science and Technology*. 2019;22:538-547. <https://doi.org/10.1016/J.JESTCH.2018.11.010>.
20. Surin V.A., Nazarov Yu.N. *Mass and heat transfer, hydrogasdynamics of a metallurgical bath*. Moscow: Metallurgiya; 1993, 352 p. (In Russ.).
21. Popel' S.I. *Surface phenomena in melts*. Moscow: Metallurgiya; 1994, 432 p. (In Russ.).
22. Markov B.L. *Methods of open-hearth bath blowing*. Moscow: Metallurgiya; 1975, 279 p. (In Russ.).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Булатов Константин Валерьевич,

к.т.н.,  
генеральный директор,  
АО «Уралмеханобр»,  
620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87, Россия  
Bulatov\_KV@umbr.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>

##### Konstantin V. Bulatov,

Cand. Sci. (Eng.),  
CEO,  
Uralmehanoobr OJSC,  
87 Khokhryakov St., Ekaterinburg 620144, Russia  
Bulatov\_KV@umbr.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>

##### Жуков Владимир Петрович,

д.т.н., профессор,  
ведущий научный сотрудник,  
АО «Уралмеханобр»,  
620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87, Россия  
✉ Zhukov\_VP@umbr.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-3030-0077>

##### Vladimir P. Zhukov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Leading Researcher,  
Uralmehanoobr OJSC,  
87 Khokhryakov St., Ekaterinburg 620144, Russia  
✉ Zhukov\_VP@umbr.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-3030-0077>

##### Меньшиков Викентий Алексеевич,

к.т.н.,  
старший научный сотрудник,  
АО «Уралмеханобр»,  
620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87, Россия  
Menshchikov\_VA@umbr.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5474-8829>

##### Vikentiy A. Menshchikov,

Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher,  
Uralmehanoobr OJSC,  
87 Khokhryakov St., Ekaterinburg 620144, Russia  
Menshchikov\_VA@umbr.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5474-8829>

##### Братыгин Евгений Владимирович,

к.т.н.,  
заведующий лабораторией,  
АО «Уралмеханобр»,  
620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87, Россия  
bev@umbr.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-4049-3797>

##### Evgeniy V. Bratygin,

Cand. Sci. (Eng.),  
Head of the Laboratory,  
Uralmehanoobr OJSC,  
87 Khokhryakov St., Ekaterinburg 620144, Russia  
bev@umbr.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-4049-3797>

#### Заявленный вклад авторов

#### Authors' contribution

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to the article.

#### Конфликт интересов

#### Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

#### Информация о статье

#### Information about the article

Статья поступила в редакцию 31.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.11.2024 г.; принята к публикации 02.12.2024 г.

The article was submitted 31.10.2024; approved after reviewing 25.11.2024; accepted for publication 02.12.2024.

## МЕТАЛЛУРГИЯ

Обзорная статья

УДК 669

EDN: DFVWFG

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-623-633



## Каталитическое влияние карбидообразующих оксидов на процесс графитизации углеродных изделий, эксплуатируемых в металлургии

О.О. Ерохина<sup>1</sup>✉, Н.А. Пирогова<sup>2</sup><sup>1</sup>ОАО «Красцветмет», Красноярск, Россия<sup>2</sup>НИЦ «Гидрометаллургия», Санкт-Петербург, Россия

**Резюме.** Цель – провести изучение вопроса о возможности использования карбидообразующих оксидов в качестве катализаторов для процесса графитизации изделий, используемых в металлургии. Проведен анализ опубликованных данных о роли катализаторов (карбидообразующих металлов и их оксидов) для процесса графитизации углеграфитовых материалов. Показано, что данные катализаторы процесса графитизации могут в значительной степени снижать температуру графитизации. При этом сохраняются физико-химические свойства, характерные для углеграфитовых материалов, графитизированных без использования катализаторов. Выявлено, что в случае с сыпучими материалами при использовании катализаторов температура графитизации может быть снижена до 1200–1500°C (против 2000°C и более). Приведено описание механизма каталитической графитизации, включающего две реакции: взаимодействие между металлом (или его оксидом) с углеродом с образованием карбида; последующее образование чистого металла и карбидоподобного графита при повышении температуры. Полученная графитовая фаза является центром кристаллизации. Выявлена основная проблема использования катализаторов при производстве графитизированных изделий – удаление продуктов реакции, в том числе металлов. Показано, что подшихтовку катализатором можно производить на стадии смешения и формовки, вследствие чего часть продуктов реакции будет удаляться еще на этапе обжига заготовки. Предполагается, что механизм удаления продуктов реакции будет сопоставим с удалением золы из графитизируемой заготовки. При этом доказана эффективность содержания карбидообразующих оксидов в изделии даже в незначительном количестве (до 5 масс. %). Вследствие этого, а также при учете возможности подбора катализатора, в зависимости от условий дальнейшей эксплуатации возможно снижение негативного влияния избыточного содержания оксидов в шихте. Таким образом, использование катализаторов для процесса графитизации электродов, эксплуатируемых в металлургии, является перспективным способом снижения температуры процесса, однако требуется подбор оптимального содержания оксидов и корректировка режимов электротермических процессов с целью адаптации технологии для крупногабаритных изделий.

**Ключевые слова:** карбидообразующие оксиды, графитизация, катализ, углеграфитовые материалы, графитизированные электроды, графитизированные катоды, графитизированные аноды

**Для цитирования:** Ерохина О.О., Пирогова Н.А. Каталитическое влияние карбидообразующих оксидов на процесс графитизации углеродных изделий, эксплуатируемых в металлургии // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 623–633. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-623-633>. EDN: DFVWFG.

## METALLURGY

Review article

## Catalytic effect of carbide-forming oxides on the graphitization of carbon objects used in metallurgy

Olga O. Erokhina<sup>1</sup>✉, Nadezhda A. Pirogova<sup>2</sup><sup>1</sup>JSC «Krasstsvetmet», Krasnoyarsk, Russia<sup>2</sup>Nietz Technologies, Saint-Petersburg, Russia

**Abstract.** The paper aims to study the possibility of using carbide-forming oxides as catalysts for the graphitization of objects used in metallurgy. Published data on the role of catalysts (carbide-forming metals and their oxides) for the graphitization of carbon materials was analyzed. These graphitization catalysts are shown to be able to significantly reduce the graphitization temperature. The physicochemical properties characteristic of carbon

materials graphitized without the use of catalysts are preserved. It was revealed that in the case of bulk materials, the graphitization temperature can be reduced to 1200–1500°C with the use of catalysts (as opposed to 2000°C and above). The mechanism of catalytic graphitization involving two reactions is described: interaction between a metal (or its oxide) and carbon with the formation of carbide; subsequent formation of pure metal and carbide-like graphite with increasing temperature. The resulting graphite phase constitutes the crystallization nucleus. The main problem associated with the use of catalysts in the production of graphitized objects was identified—the removal of reaction products, including metals. It is shown that additional catalyst charging can be performed at the stage of mixing and forming, which results in the removal of a part of the reaction products at the stage of baking. The mechanism of removing reaction products is expected to be comparable to ash removal from the piece to be graphitized. It was proven effective for objects to contain carbide-forming oxides, even in insignificant amounts (up to 5 wt%). Due to this, as well as given the possibility of catalyst selection, the negative effect of excessive oxide content in the charge can be reduced depending on further operating conditions. Thus, the use of catalysts for the graphitization of electrodes used in metallurgy is a promising way to reduce the process temperature. However, it is required to select the optimal oxide content and adjust the conditions of electrothermal processes in order to adapt the technology for large-sized products.

**Keywords:** carbide-forming oxides, graphitization, catalysis, carbon-graphite materials, graphitized electrodes, graphitized cathodes, graphitized anodes

**For citation:** Erokhina O.O., Pirogova N.A. Catalytic effect of carbide-forming oxides on the graphitization of carbon objects used in metallurgy. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):623-633. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-623-633>. EDN: DFWWFG.

## ВВЕДЕНИЕ

Углеродные материалы нашли широкое распространение в металлургической промышленности в качестве электродов, что обуславливается их высокой электропроводностью и инертностью к агрессивным средам [1]. Для каждого отдельного производства характерен свой набор требований, предопределяющий качество углеродных изделий: так, в случае с электродами электродуговых печей и анодами электролиза алюминия срок службы определяется стойкостью к окислению, что обуславливает интерес к оценке данного параметра и решениям, нацеленным на снижение расхода изделий [2]. Однако есть общие свойства электродов, влияющие на эксплуатацию изделий вне зависимости от конкретного агрегата. Так, важнейшую роль играет плотность электрода, что обуславливается влиянием данного параметра на окислительную стойкость, на интеркаляцию ионов вглубь изделия, на абразивный и химический износ [3].

Основные параметры углеродных изделий, в том числе электропроводность, плотность, прочности на сжатие и изгиб, зависят от параметров сырьевых материалов [4] и режимов электротермических процессов: обжига и графитизации [5].

Процесс графитизации играет ключевую роль в производстве электродов, что связано с формированием графитовой структуры на данном этапе, ростом размеров гексагональной сетки, формированием параллель-

ных слоев и взаимной ориентацией углеродных гексагонов [6].

Принято выделять графитизирующиеся и неграфитизирующиеся виды углеродных материалов. Так, в качестве наполнителей в графитизированных изделиях широкое распространение получил нефтяной кокс, исследуются возможности вовлечения ацетиленового и пекового коксов [7]. В случае же эксплуатации аморфных изделий (например, катодных блоков) подины электролизеров для получения алюминия в качестве наполнителя традиционно используют антрацит, который, несмотря на высокие показатели электропроводности, характеризуется низкой графитизируемостью [8].

Предполагается, что фактором, влияющим на графитизируемость, является наличие сильных поперечных связей, осложняющих процесс рекристаллизации, заключающийся в смещении сегментов, содержащих параллельные плоскости [6]. Полученное изделие, таким образом, не характеризуется графитовой структурой и обладает худшими характеристиками относительно графитизированного. Данный фактор ограничивает применимость различных материалов, в том числе технического углерода, древесного угля и антрацита.

Степень графитизации принято определять как косвенно по значениям плотности и электропроводности, так и при применении рентгенофазового анализа по пику (002). Основными параметрами считаются межплоскостное расстояние  $d_{002}$  и размеры кристаллитов  $L_a$  и  $L_c$  [9].

Режимы процесса графитизации предполагают достижения температур свыше 2000°C (зачастую 2400–2600°C) и изотермическую выдержку [10]. Параметры нагрева играют важнейшую роль в формировании плотных образцов, в случае высокой скорости нагрева возможно образование дефектов, в том числе неравномерная усадка, трещины и другие.

Графитизация как технологический процесс связана со значительными энергетическими затратами и экономическими издержками, что обуславливает заинтересованность во внедрении решений, позволяющих снизить стоимость передела [11]. Можно выделить несколько разных подходов, позволяющих минимизировать издержки. К ним можно отнести корректировку режимов графитизации, что в том числе позволяет повысить целевые характеристики электродной продукции, и использование катализаторов с целью снижения температуры графитизации [12]. Последнее также дает возможность вовлекать в процесс производства неграфитизируемые материалы.

## **КАТАЛИТИЧЕСКАЯ ГРАФИТИЗАЦИЯ**

**Процессы каталитической графитизации.** Выделяют несколько процессов каталитической графитизации, в зависимости от исходного углеродного материала, используемого катализатора и температуры процесса [13].

1. Образование графитовой фазы может происходить ввиду перенасыщения при его растворении в расплаве металла или карбида металла.

2. В случае с процессами карбидообразования, при высоких температурах происходит взаимодействие между металлом или оксидом с образованием карбида. С последующим повышением температуры происходит процесс образования чистого металла, при этом оставшийся углерод формирует графитовую структуру, схожую по кристаллическому строению с исходным карбидом.

3. С целью упрощения процесса графитизации возможно химическое удаление интеркалированных атомов, затрудняющих упорядочивание. Основным отличием данного процесса является то, что он может быть использован исключительно для графитизируемых углеродных материалов.

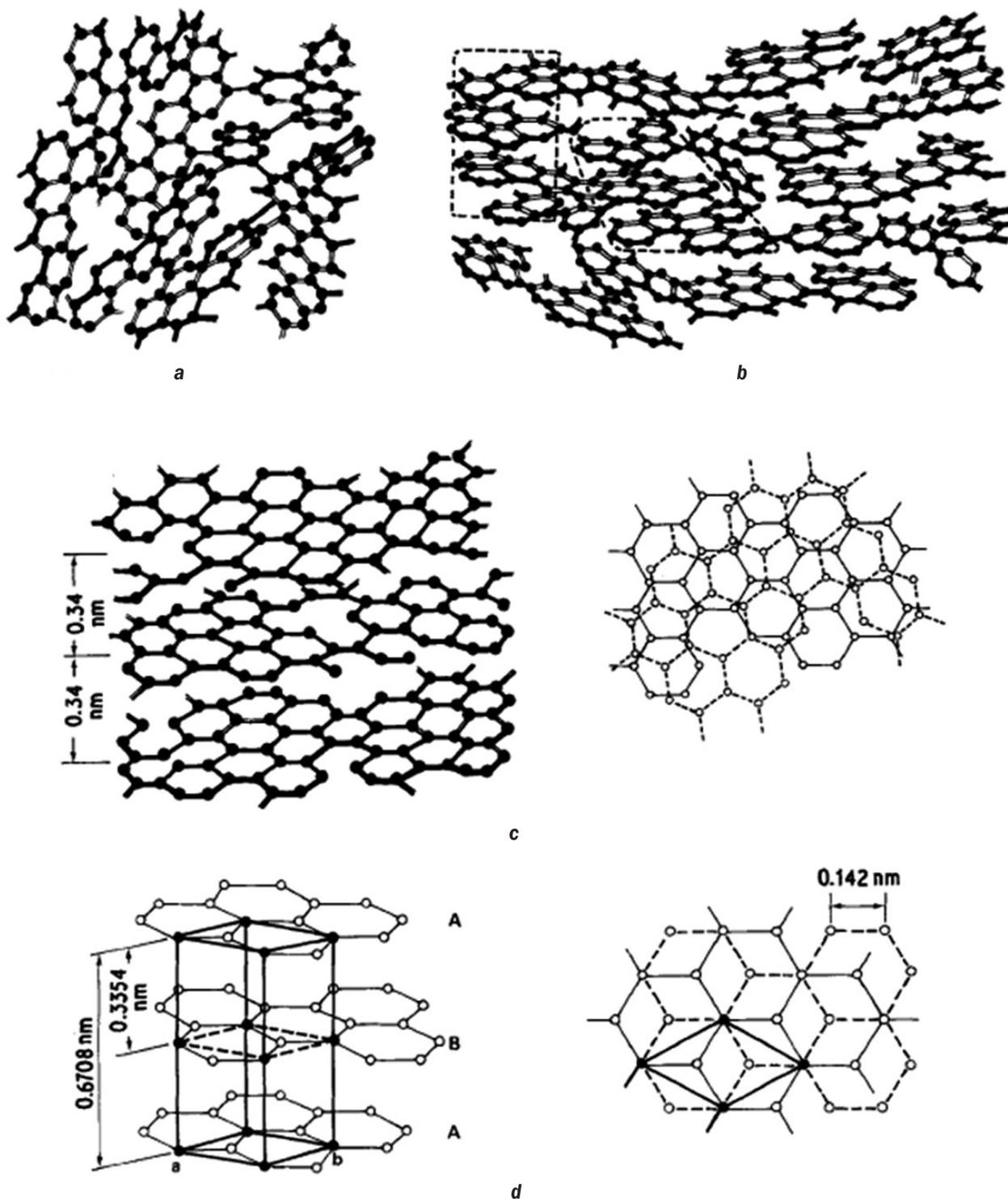
Наибольшей применимостью для крупногабаритных изделий является использование второго процесса – формирование графитовой фазы при использовании карбидообразующих металлов и их оксидов, что обуславливается возможностью примешивания части оксидов в смесь или нанесения на поверхность изделия. Данный процесс не требует внесения значительных корректировок в технологию изготовления электродов и сопоставим с процессами, происходящими с золами в ходе графитизации [14].

**Влияние каталитической графитизации на графитизируемые и неграфитизируемые типы углеродных материалов.** Принципиально принято выделять различные структуры углеродных материалов (рис. 1). Так, в качестве промежуточного этапа между графитизируемой структурой исходного вещества (b) и графитовой (d) выделяют турбостратную (c). Для данной структуры характерно случайное расположение между слоями, при этом соблюдается параллельность.

Механизмы каталитической графитизации в значительной степени различаются для графитизируемых и неграфитизируемых материалов [16]. Взаимодействие между катализатором и графитизируемым углеродным материалом упрощено, вследствие чего формирование графитовой структуры происходит при значительно меньших температурах, чем в случае отсутствия катализатора [17]. При исследовании неграфитизируемых образцов углеродных материалов и катализаторов графитизации наблюдается образование турбостратной структуры при более низких температурах. Последующее достижение графитовой структуры требует температур, сопоставимых для образования графита из графитизируемых материалов без катализатора [18].

**Сравнение металлов и оксидов металлов в качестве катализаторов.** В случае исследования карбидообразующих металлов и оксидов данных металлов в качестве катализаторов наблюдается схожий характер взаимодействия с углеродными материалами (рис. 2) [19, 20].

В [19] проводились исследования для образцов графитизируемого нефтяного кокса с последующим нагревом до 1300°C. Полученная структура сравнивалась с графитом. На основании проведенных исследований был сделан вывод о том, что степень графит-

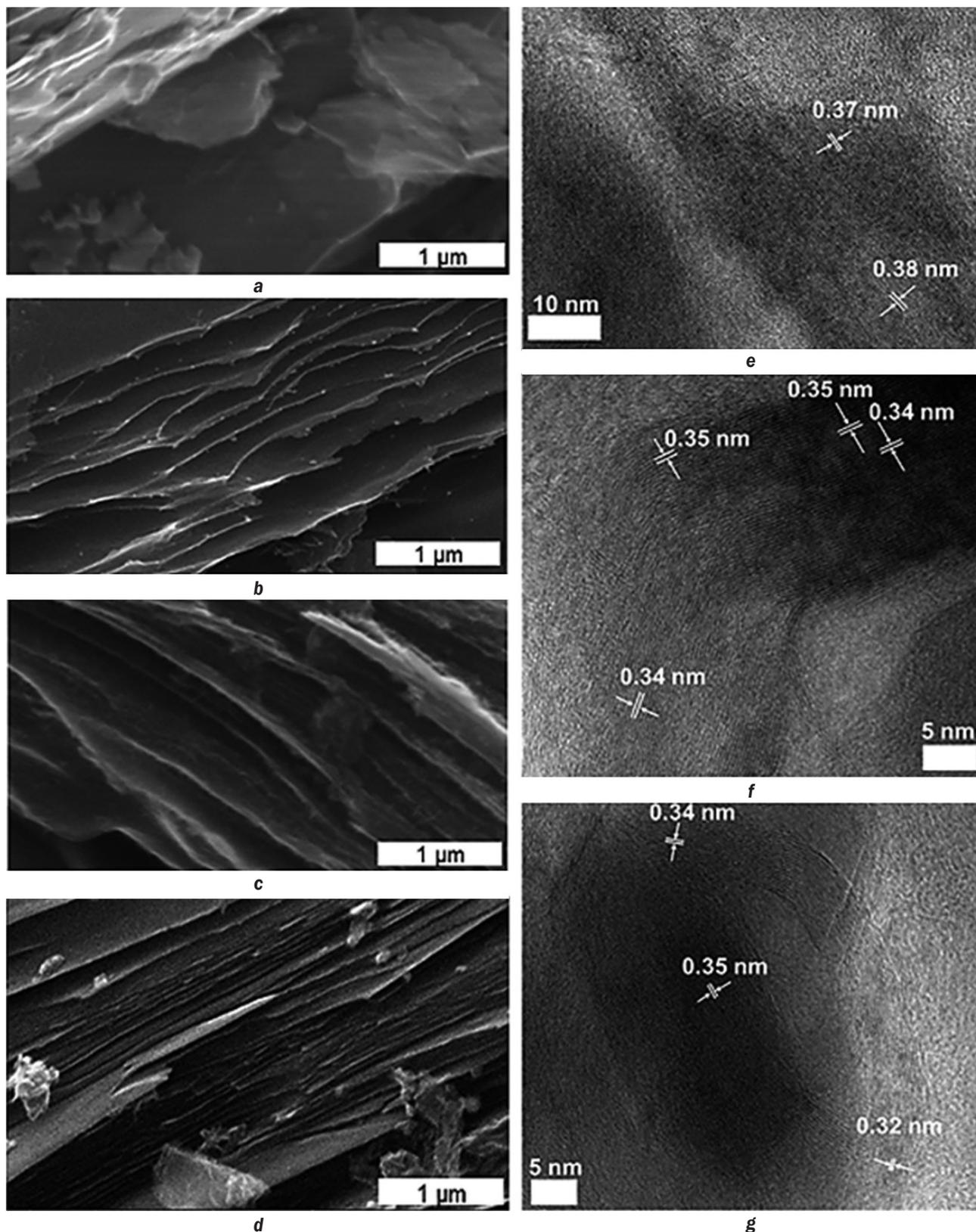


**Рис. 1.** Схемы структур (а) изотропного, (б) графитизируемого, (с) турбостратного, (д) графитизированного видов углерода [15]

**Fig. 1.** Structure diagrams of (a) isotropic, (b) graphitized, (c) turbostratic, (d) graphitized carbon [15]

тизации при использовании железа и оксида железа в качестве катализаторов идентична и соответствует образцу графита. Таким образом, возможно замещение чистого металла оксидами, что позволяет удешевлять процесс каталитической графитизации. По-

бочные продукты реакции в дальнейшем могут удаляться при использовании кислот. Данный процесс, однако, скорее применим именно для порошкообразных образцов ввиду крупных габаритов изделий, эксплуатируемых в промышленности.



**Рис. 2.** Анализ морфологии (а) графита, (b) нефтяного кокса GPC (от англ. graphitized petroleum coke – графитизированный нефтяной кокс) после высокотемпературной обработки, (c) нефтяного кокса GPC с Fe после высокотемпературной обработки, (d) нефтяного кокса GPC с  $Fe_2O_3$  после высокотемпературной обработки, (e) нефтяного кокса GPC, (f) нефтяного кокса GPC с Fe, (g) нефтяного кокса GPC с  $Fe_2O_3$  [19]

**Fig. 2.** Morphology analysis of (a) graphite, (b) GPC graphitized petroleum coke after high temperature treatment, (c) GPC graphitized petroleum coke with Fe, (d) GPC graphitized petroleum coke with  $Fe_2O_3$ , (e) GPC graphitized petroleum coke, (f) GPC graphitized petroleum coke with Fe, (g) GPC graphitized petroleum coke with  $Fe_2O_3$  [19]

**Механизм взаимодействия между карбидообразующим оксидом и углеродом.** Реакции, происходящие в ходе нагрева углеродсодержащего изделия с оксидами карбидообразующих металлов, в общем виде могут быть описаны образованием карбида (1) и металла (2):



По формуле (1) происходит образование карбида, при этом для каждого из карбидообразующих оксидов температура карбидообразования различается, в общем случае превышая 1000°C [21].

В дальнейшем при нагреве по реакции (2) происходят образование металла [22] и последующее выделение графитовой фазы. В случае с печами графитизации для металла характерно дальнейшее испарение, благодаря чему в ходе последующей эксплуатации графитизированного изделия не происходит загрязнения производимого металла или сплава продуктами реакции каталитической графитизации [23].

В литературных источниках представлены данные по вовлечению в качестве катализаторов различных карбидообразующих оксидов, в том числе оксида кремния [24], оксида хрома [25], оксида молибдена [26], оксида ванадия [27], оксида железа [19, 28] и оксида никеля [29]. Для оксидов железа и никеля характерна наиболее низкая температура карбидообразования, что является преимуществом в случае с их использованием в качестве катализаторов. При этом наиболее подходящим соединением является оксид железа, что обуславливается низкой температурой возгонки образуемого металла и его низкой стоимостью.

**Режимы процесса каталитической графитизации.** На температуру графитизации влияют различные факторы, в том числе выбранный катализатор и его температура карбидообразования, размер частиц катализатора [30] и углеграфитового материала (в случае, если выбран сыпучий образец), давление [31], предварительное смешивание, массовая доля катализатора, поровая структура углеродного материала [32].

Наилучшие результаты достигаются в случае использования небольших образцов

с развитой поровой структурой [33], что связано с увеличением площади доступной поверхности. Предполагается также, что связующие материалы, проходящие через жидкофазное состояние, имеют большую расположенность к каталитической графитизации, что обуславливается возможностью равномерного распределения сыпучего катализатора в сплошном спеченном теле карбонизированного каменноугольного пека [21, 34].

Температура графитизации снижается при увеличении содержания катализатора [35]. Так, предполагается, что оптимальным значением содержания оксидов будет 40–50 масс. %, однако также доказана эффективность в случае содержания до 5 масс. % катализатора [13].

#### **ПРИМЕНИМОСТЬ ПРОЦЕССА КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ГРАФИТИЗАЦИИ ДЛЯ УГЛЕГРАФИТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В МЕТАЛЛУРГИИ**

В случае с использованием каталитической графитизации для графитизированных изделий, используемых в металлургии, наблюдается ряд ограничений. Так, электроды характеризуются значительными размерами, а также низкой пористостью [36], что обуславливает затруднения при нанесении карбидообразующих оксидов и дальнейшем их удалении.

Первостепенным является сложность в подшихтовке оксидов к сырью, используемому при изготовлении углеграфитовых изделий. Решением данной проблемы может являться добавление оксидов на этапе смешения и формовки, что позволит равномерно распределить катализатор в электроде. На этапе обжига дополнительная равномерность распределения будет достигаться благодаря удалению летучих соединений из каменноугольного пека [37].

Удаление побочных продуктов реакции, в том числе металла, при нагреве углеграфитового изделия будет происходить посредством выделения через поровую структуру, которая до процесса пропитки является развитой в достаточной степени [38]. При этом следует отметить, что в качестве катализаторов наиболее подходящим будет использование оксидов с низкой температурой карбидо- и металлообразования.

Важно учитывать специфику дальнейшей эксплуатации готового изделия. Так, в случае с электродами электродуговых печей дополнительная подшихтовка оксидом хрома является благоприятным фактором не только в случае со степенью графитизации, но также и для повышения окислительной стойкости [21].

С целью подбора оптимальных параметров каталитической графитизации крупногабаритных углеграфитовых изделий, используемых в металлургии, требуются дополнительные исследования. При этом даже незначительное снижение температуры электротермических процессов при сохранении значений физико-химических параметров электродов позволит снизить экономические издержки на процесс изготовления графитизированных изделий.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Экономические издержки на процесс графитизации могут быть снижены при использовании катализаторов, которые позволяют уменьшать температуру получения графитовой структуры. В качестве катализа-

торов могут выступать как карбидообразующие металлы, так и их оксиды с идентичной эффективностью.

Эффективность применения катализаторов для крупногабаритных изделий, эксплуатируемых в металлургии, изучена в недостаточной степени, что обуславливается рядом ограничений, в том числе сложностями в подшихтовке и дальнейшим удалением продуктов реакции. Однако в случае с низким содержанием катализатора (до 5 масс. %) данные задачи являются решаемыми и требуют дополнительного изучения.

Каталитическая эффективность наблюдалась для большого числа карбидообразующих оксидов, что позволяет гибко подходить к подбору катализатора. Наибольшая экономическая эффективность может достигаться при использовании оксидов с низкой температурой карбидо- и металлообразования (например, оксидов железа). При этом подбор катализаторов может вестись с учетом потенциального положительного эффекта продуктов реакции на дальнейшую эксплуатацию изделия.

## **Список источников**

1. Feng Gao, Naixiang Feng, Qingren Niu, Hua He, Ligu Han, Jianzhuang Yang. Study on graphitization of cathode carbon blocks for aluminum electrolysis // *Light Metals* / eds. C.E. Suarez. Cham: Springer, 2012. P. 1355–1357. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48179-1\\_234](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48179-1_234).
2. Moghadam H.A., Jabbari M., Daneshmand S., Jazi S.R., Khosravi A. Effects of TiO<sub>2</sub>/SiC/SiO<sub>2</sub> coating on graphite electrode consumption in sublimation and oxidation states as determined by EAF simulation and experimental methods // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 420. P. 127340. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127340>.
3. Saitov A.V., Bazhin V.Yu. Features of using modified carbon-graphite lining materials in aluminum electrolyzers // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. Vol. 59. No. 3. P. 278–286. <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0221-5>.
4. Zhu Yaming, Liu Huimei, Xu Yunliang, Hu Chaoshuai, Zhao Chunlei, Cheng Junxia, et al. Preparation and characterization of coal-pitch-based needle coke (part III): the effects of quinoline insoluble in coal tar pitch // *Energy & Fuels*. 2020. Vol. 34. Iss. 7. P. 8676–8684. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01049>.
5. Ragan S., Marsh H. Science and technology of graphite manufacture // *Journal of Materials Science*. 1983. Vol. 18. P. 3161–3176. <https://doi.org/10.1007/BF00544139>.
6. Уббелоде А.Р. Графит и его кристаллические соединения / пер. с англ.; под ред. Е.С. Головиной и О.А. Цухановой. М.: Мир, 1965. 256 с.
7. Perruchoud R., Fischer W., Meier M., Mannweiler U. Coke selection criteria for abrasion resistant graphitized cathodes // *Light Metals* / eds. S.J. Lindsay. Cham: Springer, 2011. P. 1067–1072. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48160-9\\_181](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48160-9_181).
8. Belitskus D. Effect of anthracite properties and formulation on properties of bench scale cathode blocks for aluminum smelting // *Metallurgical Transactions B*. 1976. Vol. 7. P. 543–549. <https://doi.org/10.1007/BF02698586>.
9. Oberlin A., Boichard S., Oshida K. Landmarks for graphitization // *Tanso*. 2006. Vol. 224. P. 281–298. <https://doi.org/10.7209/tanso.2006.281>.
10. Frohs W., Roeßner F. Expansion of carbon artifacts during graphitization – an industrial issue // *Tanso*. 2015. Вып. 267. P. 77–83. <https://doi.org/10.7209/tanso.2015.77>.
11. Kuznetsov D.M., Korobov V.K. A comparison of properties of electrodes graphitized by the Acheson and Castner methods // *Refractories and industrial ceramics*. 2001. Vol. 42. No. 9-10. P. 355–359. <https://doi.org/10.1023/A:1014022730724>.

12. Ōya A., Yamashita R., Ōtani S. Catalytic graphitization of carbons by borons // *Fuel*. 1979. Vol. 58. Iss. 7. P. 495–500. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(79\)90167-4](https://doi.org/10.1016/0016-2361(79)90167-4).
13. Marsh H., Warburton A.P. Catalysis of graphitisation // *Journal of Applied Chemistry*. 1970. Vol. 20. No. 4. P. 133–142. <https://doi.org/10.1002/jctb.5010200409>.
14. Чалых Е.Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий. М.: Metallurgy, 1972. 423 с.
15. Ōya A., Marsh H. Phenomena of catalytic graphitization // *Journal of Materials Science*. 1982. Vol. 17. P. 309–322. <https://doi.org/10.1007/BF00591464>.
16. Ōya A., Ōtani S. Catalytic graphitization of carbons by various metals // *Carbon*. 1979. Vol. 17. Iss. 2. P. 131–137. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(79\)90020-4](https://doi.org/10.1016/0008-6223(79)90020-4).
17. Bitencourt C.S., Luz A.P., Pagliosa C., Pandolfelli V.C. Role of catalytic agents and processing parameters in the graphitization process of a carbon-based refractory binder // *Ceramics International*. 2015. Vol. 41. Iss. 10-A. P. 13320–13330. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.115>.
18. Yokokawa C., Hosokawa K., Takegami Y. A kinetic study of catalytic graphitization of hard carbon // *Carbon*. 1967. Vol. 5. Iss. 5. P. 475–480. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(67\)90024-3](https://doi.org/10.1016/0008-6223(67)90024-3).
19. Nugroho A., Nursanto E.B., Pradanawati S.A., Oktaviano H.S., Nilasary H., Nursukatmo H. Fe based catalysts for petroleum coke graphitization for Lithium Ion battery application // *Materials Letters*. 2021. Vol. 303. P. 130557. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130557>.
20. Thompson E., Danks A.E., Bourgeois L., Schnepf Z. Iron-catalyzed graphitization of biomass // *Green Chemistry*. 2014. Vol. 17. No. 1. P. 551–556. <https://doi.org/10.1039/C4GC01673D>.
21. Фещенко Р.Ю., Ерохина О.О., Литаврин И.О., Рябошук С.В. Повышение окислительной стойкости графитированных электродов дуговых печей // *Черные металлы*. 2023. № 7. P. 31–36. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.07.03>.
22. Notton G., Caluianu I., Colda I., Caluianu S. Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin // *Journal of Renewable Energies*. 2010. Vol. 13. Iss. 1. C. 49–62. <https://doi.org/10.54966/jreen.v13i1.177>.
23. Немчинова Н.В., Хоанг В.В., Апончук И.И. Изучение химического состава рафинировочных шлаков кремниевое производство для поиска путей их рациональной переработки // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 2. С. 252–263. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-252-263>. EDN: ESAGII.
24. Bachmatiuk A., Börmert F., Grobosch M., Schäffel F., Wolff U., Scott A., et al. Investigating the graphitization mechanism of SiO<sub>2</sub> nanoparticles in chemical vapor deposition // *Acs Nano*. 2009. Vol. 3. Iss. 12. P. 4098–4104. <https://doi.org/10.1021/nn9009278>.
25. Mochida I., Ohtsubo R., Takeshita K., Marsh H. Catalytic graphitization of graphitizable carbon by chromium, manganese and molybdenum oxides // *Carbon*. 1980. Vol. 18. Iss. 1. P. 25–30. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(80\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0008-6223(80)90077-9).
26. Mochida I., Ohtsubo R., Takeshita K., Marsh H. Catalytic graphitization of non-graphitizable carbon by chromium and manganese oxides // *Carbon*. 1980. Vol. 18. Iss. 2. P. 117–123. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(80\)90019-6](https://doi.org/10.1016/0008-6223(80)90019-6).
27. Zhang Yude, Li Yan, Zhang Qian, Li Guangzhen. Graphitization of anthracite catalyzed by single metal oxides and its enhanced electrical conductivity // *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2024. Vol. 44. Iss. 9. P. 1227–1245. <https://doi.org/10.1080/19392699.2023.2270925>.
28. Gomez-Martin A., Schnepf Z., Ramirez-Rico J. Structural evolution in iron-catalyzed graphitization of hard carbons // *Chemistry of Materials*. 2021. Vol. 33. Iss. 9. P. 3087–3097. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.0c04385>.
29. Wang Keliang, Cao Yuhe, Wang Xiaomin, Kharel P.R., Gibbons W., Luo Bing, et al. Nickel catalytic graphitized porous carbon as electrode material for high performance supercapacitors // *Energy*. 2016. Vol. 101. P. 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.059>.
30. Ōya A., Ōtani S. Influences of particle size of metal on catalytic graphitization of non-graphitizing carbons // *Carbon*. 1981. Vol. 19. Iss. 5. P. 391–400. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(81\)90064-6](https://doi.org/10.1016/0008-6223(81)90064-6).
31. Liu Yuanhao, Liu Qinglei, Gu Jiajun, Kang Danmiao, Zhou Fengyu, Zhang Wang, et al. Highly porous graphitic materials prepared by catalytic graphitization // *Carbon*. 2013. Vol. 64. P. 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.07.044>.
32. Casado A., Torralba J.M., Milenkovic S. Wettability and infiltration of liquid silicon on graphite substrates // *Metals*. 2019. Vol. 9. Iss. 3. P. 300. <https://doi.org/10.3390/met9030300>.
33. Roger J., Chollon G. Mechanisms and kinetics during reactive infiltration of molten silicon in porous graphite // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. Iss. 7-A. P. 8690–8699. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.01.191>.
34. Lewis I.C. Chemistry of pitch carbonization // *Fuel*. 1987. Vol. 66. Iss. 11. P. 1527–1531. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(87\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0016-2361(87)90012-3).
35. Cao Haiyue, Li Kuo, Zhang Hao, Liu Qinfu Investigation on the mineral catalytic graphitization of anthracite during series high temperature treatment // *Minerals*. 2023. Vol. 13. Iss. 6. P. 749. <https://doi.org/10.3390/min13060749>.

36. Patel P., Hyland M., Hiltmann F. Influence of internal cathode structure on behavior during electrolysis part II: Porosity and wear mechanisms in graphitized cathode material // *Light Metals* / eds. A. Tomsett, J. Johnson. Cham: Springer, 2016. P. 1017–1022. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48200-2\\_136](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48200-2_136).
37. Arnesen K., Aarhaug T.A., Einarsrud K.E., Tranell G.M. Influence of atmosphere and temperature on polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from green anode paste baking // *ACS Omega*. 2023. Vol. 8. Iss. 20. P. 18116–18121. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01411>.
38. Kim Changkyu, Kwon Woong, Lee Moon Hee, Woo Jong Seok, Jeong Euigyung. Correlation between Pitch Impregnation pressure and pore sizes of graphite block // *Materials*. 2022. Vol. 15. Iss. 2. P. 561. <https://doi.org/10.3390/ma15020561>.

## References

1. Feng Gao, Naixiang Feng, Qingren Niu, Hua He, Ligu Han, Jianzhuang Yang. Study on graphitization of cathode carbon blocks for aluminum electrolysis. In: Suarez C.E. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2012, p. 1355-1357. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48179-1\\_234](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48179-1_234).
2. Moghadam H.A., Jabbari M., Daneshmand S., Jazi S.R., Khosravi A. Effects of TiO<sub>2</sub>/SiC/SiO<sub>2</sub> coating on graphite electrode consumption in sublimation and oxidation states as determined by EAF simulation and experimental methods. *Surface and Coatings Technology*. 2021;420:127340. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127340>.
3. Saitov A.V., Bazhin V.Yu. Features of using modified carbon-graphite lining materials in aluminum electrolyzers. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018;59(3):278-286. <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0221-5>.
4. Zhu Yaming, Liu Huimei, Xu Yunliang, Hu Chaoshuai, Zhao Chunlei, Cheng Junxia, et al. Preparation and characterization of coal-pitch-based needle coke (Part III): The effects of quinoline insoluble in coal tar pitch. *Energy & Fuels*. 2020;34(7):8676-8684. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01049>.
5. Ragan S., Marsh H. Science and technology of graphite manufacture. *Journal of Materials Science*. 1983;18:3161-3176. <https://doi.org/10.1007/BF00544139>.
6. Ubbelohde A.R. Graphite and its crystal compounds. Oxford: Clarendon Press; 1960, 217 p. (Russ. ed.: *Графит и его кристаллические соединения*. Moscow: Mir; 1965, 256 p.)
7. Perruchoud R., Fischer W., Meier M., Mannweiler U. Coke selection criteria for abrasion resistant graphitized cathodes. In: Lindsay S.J. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2011, p. 1067-1072. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48160-9\\_181](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48160-9_181).
8. Belitskus D. Effect of anthracite properties and formulation on properties of bench scale cathode blocks for aluminum smelting. *Metallurgical Transactions B*. 1976;7:543-549. <https://doi.org/10.1007/BF02698586>.
9. Oberlin A., Boichard S., Oshida K. Landmarks for graphitization. *Tanso*. 2006;224:281-298. <https://doi.org/10.7209/tanso.2006.281>.
10. Frohs W., Roeßner F. Expansion of carbon artifacts during graphitization – an industrial issue. *Tanso*. 2015;267:77-83. <https://doi.org/10.7209/tanso.2015.77>.
11. Kuznetsov D.M., Korobov V.K. A comparison of properties of electrodes graphitized by the Acheson and Castner methods. *Refractories and industrial ceramics*. 2001;42(9-10):355-359. <https://doi.org/10.1023/A:1014022730724>.
12. Ōya A., Yamashita R., Ōtani S. Catalytic graphitization of carbons by borons. *Fuel*. 1979;58(7):495-500. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(79\)90167-4](https://doi.org/10.1016/0016-2361(79)90167-4).
13. Marsh H., Warburton A.P. Catalysis of graphitization. *Journal of Applied Chemistry*. 1970;20(4):133-142. <https://doi.org/10.1002/jctb.5010200409>.
14. Chalykh E.F. *Technology and equipment of electrode and electric coal enterprises*. Moscow: Metallurgiya; 1972, 423 p. (In Russ.).
15. Ōya A., Marsh H. Phenomena of catalytic graphitization. *Journal of Materials Science*. 1982;17:309-322. <https://doi.org/10.1007/BF00591464>.
16. Ōya A., Ōtani S. Catalytic graphitization of carbons by various metals. *Carbon*. 1979;17(2):131-137. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(79\)90020-4](https://doi.org/10.1016/0008-6223(79)90020-4).
17. Bitencourt C.S., Luz A.P., Pagliosa C., Pandolfelli V.C. Role of catalytic agents and processing parameters in the graphitization process of a carbon-based refractory binder. *Ceramics International*. 2015;41(10-A):13320-13330. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.115>.
18. Yokokawa C., Hosokawa K., Takegami Y. A kinetic study of catalytic graphitization of hard carbon. *Carbon*. 1967;5(5):475-480. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(67\)90024-3](https://doi.org/10.1016/0008-6223(67)90024-3).
19. Nugroho A., Nursanto E.B., Pradanawati S.A., Oktaviano H.S., Nilasary H., Nursukatmo H. Fe based catalysts for petroleum coke graphitization for Lithium-ion battery application. *Materials Letters*. 2021;303:130557. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130557>.
20. Thompson E., Danks A.E., Bourgeois L., Schnepf Z. Iron-catalyzed graphitization of biomass. *Green Chemistry*. 2014;17(1):551-556. <https://doi.org/10.1039/C4GC01673D>.
21. Feshchenko R.Y., Erokhina O.O., Litavrin I.O., Ryaboshuk S.V. Improvement of oxidation resistance of arc furnace graphite electrodes. *Chernye Metally*. 2023;7:31-36. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.07.03>.

22. Notton G., Caluianu I., Colda I., Caluianu S. Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin. *Journal of Renewable Energies*. 2010;13(1):49-62. <https://doi.org/10.54966/jreen.v13i1.177>.
23. Nemchinova N.V., Hoang V.V., Aponchuk I.I. Research into the chemical composition of refinery slag from silicon production for its efficient recycling. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):252-263. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-252-263>. EDN: ESAGII.
24. Bachmatiuk A., Börrnert F., Grobosch M., Schäffel F., Wolff U., Scott A., et al. Investigating the graphitization mechanism of SiO<sub>2</sub> nanoparticles in chemical vapor deposition. *Acs Nano*. 2009;3(12):4098-4104. <https://doi.org/10.1021/nn9009278>.
25. Mochida I., Ohtsubo R., Takeshita K., Marsh H. Catalytic graphitization of graphitizable carbon by chromium, manganese and molybdenum oxides. *Carbon*. 1980;18(1):25-30. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(80\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0008-6223(80)90077-9).
26. Mochida I., Ohtsubo R., Takeshita K., Marsh H. Catalytic graphitization of non-graphitizable carbon by chromium and manganese oxides. *Carbon*. 1980;18(2):117-123. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(80\)90019-6](https://doi.org/10.1016/0008-6223(80)90019-6).
27. Zhang Yude, Li Yan, Zhang Qian, Li Guangzhen. Graphitization of anthracite catalyzed by single metal oxides and its enhanced electrical conductivity. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2024;44(9):1227-1245. <https://doi.org/10.1080/19392699.2023.2270925>.
28. Gomez-Martin A., Schnepf Z., Ramirez-Rico J. Structural evolution in iron-catalyzed graphitization of hard carbons. *Chemistry of Materials*. 2021;33(9):3087-3097. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.0c04385>.
29. Wang Keliang, Cao Yuhe, Wang Xiaomin, Kharel P.R., Gibbons W., Luo Bing, et al. Nickel catalytic graphitized porous carbon as electrode material for high performance supercapacitors. *Energy*. 2016;101:9-15. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.059>.
30. Ōya A., Ōtani S. Influences of particle size of metal on catalytic graphitization of non-graphitizing carbons. *Carbon*. 1981;19(5):391-400. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(81\)90064-6](https://doi.org/10.1016/0008-6223(81)90064-6).
31. Liu Yuanhao, Liu Qinglei, Gu Jiajun, Kang Danmiao, Zhou Fengyu, Zhang Wang, et al. Highly porous graphitic materials prepared by catalytic graphitization. *Carbon*. 2013;64:132-140. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.07.044>.
32. Casado A., Torralba J.M., Milenkovic S. Wettability and infiltration of liquid silicon on graphite substrates. *Metals*. 2019;9(3):300. <https://doi.org/10.3390/met9030300>.
33. Roger J., Chollon G. Mechanisms and kinetics during reactive infiltration of molten silicon in porous graphite. *Ceramics International*. 2019;45(7-A):8690-8699. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.01.191>.
34. Lewis I.C. Chemistry of pitch carbonization. *Fuel*. 1987;66(11):1527-1531. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(87\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0016-2361(87)90012-3).
35. Cao Haiyue, Li Kuo, Zhang Hao, Liu Qinfu Investigation on the mineral catalytic graphitization of anthracite during series high temperature treatment. *Minerals*. 2023;13(6):749. <https://doi.org/10.3390/min13060749>.
36. Patel P., Hyland M., Hiltmann F. Influence of internal cathode structure on behavior during electrolysis part II: Porosity and wear mechanisms in graphitized cathode material. In: Tomsett A., Johnson J. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2016, p. 1017-1022. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48200-2\\_136](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48200-2_136).
37. Arnesen K., Aarhaug T.A., Einarsrud K.E., Tranell G.M. Influence of atmosphere and temperature on polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from green anode paste baking. *ACS Omega*. 2023;8(20):18116-18121. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01411>.
38. Kim Changkyu, Kwon Woong, Lee Moon Hee, Woo Jong Seok, Jeong Euigyung. Correlation between pitch impregnation pressure and pore sizes of graphite block. *Materials*. 2022;15(2):561. <https://doi.org/10.3390/ma15020561>.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### **Ерохина Ольга Олеговна,**

специалист по маркетинговым исследованиям,  
ОАО «Красноярский завод цветных металлов  
имени В.Н. Гулидова»,  
660123, г. Красноярск,  
Транспортный проезд, 1, Россия  
✉ o.o.erokhina@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-9570-2309>

##### **Пирогова Надежда Алексеевна,**

младший научный сотрудник,  
ООО «НИЦ «Гидрометаллургия»,  
196247, г. Санкт-Петербург,  
Ленинский просп., 151, оф. 635, Россия  
Pirogova-n@gidrometall.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### **Olga O. Erokhina,**

Market Researcher,  
JSC "Krastsvetmet",  
1, Transportny Proezd,  
Krasnoyarsk 660123, Russia  
✉ o.o.erokhina@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-9570-2309>

##### **Nadezhda A. Pirogova,**

Junior Researcher,  
Nietz Technologies,  
151, Leninsky pr., office 635,  
Saint-Petersburg 196247, Russia  
Pirogova-n@gidrometall.ru

**Заявленный 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 15.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 02.11.2024 г.; принята к публикации 20.11.2024 г.

**Authors' contribution**

The authors contributed equally to the article.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

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

**Information about the article**

The article was submitted 15.10.2024; approved after reviewing 02.11.2024; accepted for publication 20.11.2024.

## МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья  
УДК 669.713.723  
EDN: BPMVPW  
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-635-646



## Разработка методики постановки высокоамперного электролизёра на электрический обжиг с использованием плавких вставок

Е.Ю. Радионов<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр», Красноярск, Россия

**Резюме.** Цель – разработка и апробация методики расчета подключения электролизера на электрический обжиг без отключения тока серии корпусов электролиза с использованием алюминиевых плавких вставок. Для расчетов сложной электрической цепи был использован метод преобразования электрической цепи, непосредственного применения законов Кирхгофа. Выявление и расчеты полученных закономерностей проводились с помощью графических и аналитических методов. Математическое моделирование проводилось с помощью апробированных компьютерных программ. Разработана методика расчета подключения электролизера на электрический обжиг без отключения тока серии корпусов электролиза. Выполнены расчеты (математическое моделирование) для двух вариантов пуска электролизера: без снятия токовой нагрузки на серии корпусов электролиза и с частичным занижением токовой нагрузки на серии до 250 кА. В корпусах электролиза были выполнены опытные испытания пуска двух высокоамперных электролизеров без отключения тока серии корпусов электролиза, т.е. при рабочем токе 330 кА, и пуск одного электролизера с занижением токовой нагрузки до 250 кА. Полученные в ходе проведенных исследований результаты свидетельствуют о том, что разработанный способ позволяет выполнять постановку высокоамперного электролизера на электрический обжиг с использованием плавких вставок без снятия токовой нагрузки на серии корпусов электролиза, либо с частичным ее занижением. Успешные опытные испытания трех высокоамперных электролизеров, работающих на силе тока 330 кА, дают возможность произвести тиражирование (распространение) данного способа обжига на другие высокоамперные электролизеры, работающие на силе тока 400, 550 кА.

**Ключевые слова:** производство алюминия, пуск электролизера, электрический обжиг, плавкие вставки, ошиновка

**Для цитирования:** Радионов Е.Ю. Разработка методики постановки высокоамперного электролизёра на электрический обжиг с использованием плавких вставок // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 635–646. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-635-646>. EDN: BPMVPW.

## METALLURGY

## Original article

## Development of a technology for setting a high-amperage electrolytic cell for electrical preheating using fusible links

Evgeniy Yu. Radionov<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>RUSAL Engineering and Technology Center LLC, Krasnoyarsk, Russia

**Abstract.** The paper aims to develop and test a design procedure for setting an electrolytic cell for electrical preheating without current interruption in a series of electrolysis units using aluminum fusible links. For the analysis of a complex electrical circuit, the circuit conversion technique, a direct application of Kirchhoff's circuit laws, was used. The obtained patterns were identified and determined using graphical and analytical methods. Mathematical modeling was performed by means of approved programs. A design procedure was developed for setting an electrolytic cell for electrical preheating without current interruption in the series of electrolysis units. The computations (mathematical modeling) were performed for two startup variants: without current load interruption in the series of electrolysis units and with the lowering of current load in the series (to 250 kA). Pilot startup tests of two high-amperage electrolytic cells were performed without current

interruption in the series of electrolysis units, i.e., at an operating current of 330 kA, as well as the startup of one electrolytic cell with the current load lowered to 250 kA. The study results indicate that the developed method allows a high-amperage electrolytic cell to be set for electrical preheating with the use of fusible links without interrupting the current load or with its lowering in the series of electrolysis units. Successful pilot tests of three high-amperage electrolytic cells operating at a current strength of 330 kA provide a means to extrapolate this preheating method to other high-amperage electrolytic cells operating at current strengths of 400 and 550 kA.

**Keywords:** aluminum production, electrolytic cell start-up, electric firing, fusing links, busbar

**For citation:** Radionov E.Yu. Development of a technology for setting a high-amperage electrolytic cell for electrical preheating using fusible links. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):635-646. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-635-646>. EDN: BPMVPW.

## ВВЕДЕНИЕ

Алюминий нашел широкое применение в различных отраслях промышленности [1, 2]. Предприятия, производящие первичный алюминий, развиваются по пути совершенствования технологии электролиза для достижения высоких технико-экономических показателей [3], поиска альтернативных источников глиноземного сырья или улучшения действующих технологий его производства [4–7], решения экологических проблем, возникающих при получении глинозема и «крылатого» металла [8–13], строительства новых заводов с установкой высокопроизводительных и экологичных высокоамперных электролизеров<sup>2</sup> [14].

Производство алюминия-сырца на современных алюминиевых заводах происходит на высокоамперных электролизерах с обожженными анодами на силе тока порядка 300–500 кА. Современные исследования показали, что более равномерным, качественным обжигом высокоамперного электролизера является электрический обжиг [15]. При высокой стоимости дизельного топлива и в тоже время наименьшей стоимости электроэнергии на алюминиевых заводах, расположенных в Сибири (Саяногорский, Иркутский, Тайшетский, Богучанский алюминиевые заводы) [16–18], использование электрического обжига является наиболее экономически приемлемым.

Обжиг и последующий пуск алюминиевого электролизера являются неотъемлемой частью его эксплуатационного либо, как отметил автор [19], «жизненного» цикла работы как промышленного агрегата. Качество обжига и пуска электролизера определяет в дальнейшем не только его срок службы, но и

влияет на основные технико-экономические показатели электролиза [20].

Согласно работе авторов [20], в производстве алюминия получили широкое распространение следующие виды обжига электролизера: обжиг на металле, обжиг на сопротивлении и термический обжиг. Прогрев электролизера в первых двух случаях происходит за счет электрического тока, проходящего через уже подключенный в электрическую цепь электролизер. При термическом (или, по-другому, газопламенном) обжиге электролизера используется энергия от сгорания углеводородов, таких как дизельное топливо или природный газ, а уже по прошествии определенного времени обжига (~ 3 сут) с достижением температуры подины, близкой к 850–950 °С, происходит подключение электролизера в электрическую цепь.

Испытания, выполненные авторами [15], показали определенные преимущества электрического обжига высокоамперного электролизера в сравнении с газопламенным.

Однако во всех случаях при пуске электролизера после газопламенного обжига или же перед постановкой электролизера на электрический обжиг требуется минимизировать потери нарабатываемого металла, связанные с остановкой всей серии электролиза с целью безопасного подключения электролизера в электрическую цепь. С этой целью была проведена данная работа, позволившая определить места установки и сечения алюминиевых плавких вставок (ПВ) для постановки электролизера на электрический обжиг либо без отключения тока серии, либо с незначительным ее снижением (~ 25% от полной нагрузки).

<sup>2</sup>РУСАЛ в Тайшете. РУСАЛ в Иркутской области // Русал. Режим доступа: <https://taishet.rusal.ru/> (дата обращения: 25.04.2024).

## РАСЧЕТ ПЛАВКИХ ВСТАВОК

Для электрического обжига в компьютерной программе, используемой для моделирования магнитогидродинамических явлений в алюминиевом электролизере [21–23], были выполнены расчеты с использованием стандартных ПВ, предполагающих снижение токовой нагрузки до 240 кА, и модернизированных. Конструкция последних позволяет поставить электролизер на электрический обжиг без снижения токовой нагрузки серии, т.е. на рабочем токе (в данном случае 330–335 кА). В свою очередь данное техническое решение предполагает не снижать наработку алюминия-сырца на серии в момент пуска (10–15 мин). Также новая конструкция ПВ позволяет провести более плавную корректировку времени перегоранием плавких элементов, в случае их использования при различной температуре ошиновки (например, в случае сезонных колебаний температуры в  $\pm 10$ – $15$  °С, или же пуска в летний и зимний периоды с возможным колебанием максимальных температур от  $-10$  до  $+80$  °С).

Перед проведением опытных испытаний по постановке на электрический обжиг трех высокоамперных электролизеров, работающих на силу тока 330 кА, были выполнены стандартные для данного алюминиевого

завода пуска электролизера, т.е. с заливкой электролита после газопламенного обжига на стандартных и модернизированных ПВ.

Стандартные ПВ на алюминиевом заводе используются с 2010 г., а их сечение подобрано опытным путем, поэтому для данных ПВ были выполнены расчеты с использованием данных, полученных при пуске электролизера на газопламенном обжиге. Результаты расчета представлены на рис. 2 и в табл. 1.

Первый опытный пуск электролизера после газопламенного обжига с модернизированными ПВ показал, что рассчитанное количество плавких элементов является избыточным. Перегорание первой ПВ происходит примерно через 18 мин после полной разборки/сборки узлов шунтирования, а последней – через 25 мин.

Также впоследствии было выявлено, что часть тока ( $\sim 30$  кА, что составляет  $\sim 10\%$  от всей токовой нагрузки) проходит через подину, т.е. минуя узлы шунтирования, а значит, и ПВ (см. табл. 2).

Далее была произведена верификация и идентификация математической модели электролизера с модернизированными ПВ. Результаты расчета представлены на рис. 4 и в табл. 3.

**Таблица 1.** Результаты расчета силы тока в стандартных плавких вставках и узлах шунтирования перед пуском на электрический обжиг

**Table 1.** Calculation results of current strength in standard fusible links and shunt units before electrolytic cell start-up for electric firing

Обозначение на схеме	Пояснение	I, кА
1 П	Плавкая вставка 1	16253
2 П	Плавкая вставка 2	16217
1 Ш	Шунт 1	72196
2 Ш	Шунт 2	34720
3 Ш	Шунт 3	57184
4 Ш	Шунт 4	34998
5 Ш	Шунт 5	71987

**Таблица 2.** Результаты измерений токораспределения перед пуском в блюмсе и катодном блоке

**Table 2.** Measurement results of current distribution before start-up in the bloom and cathode block

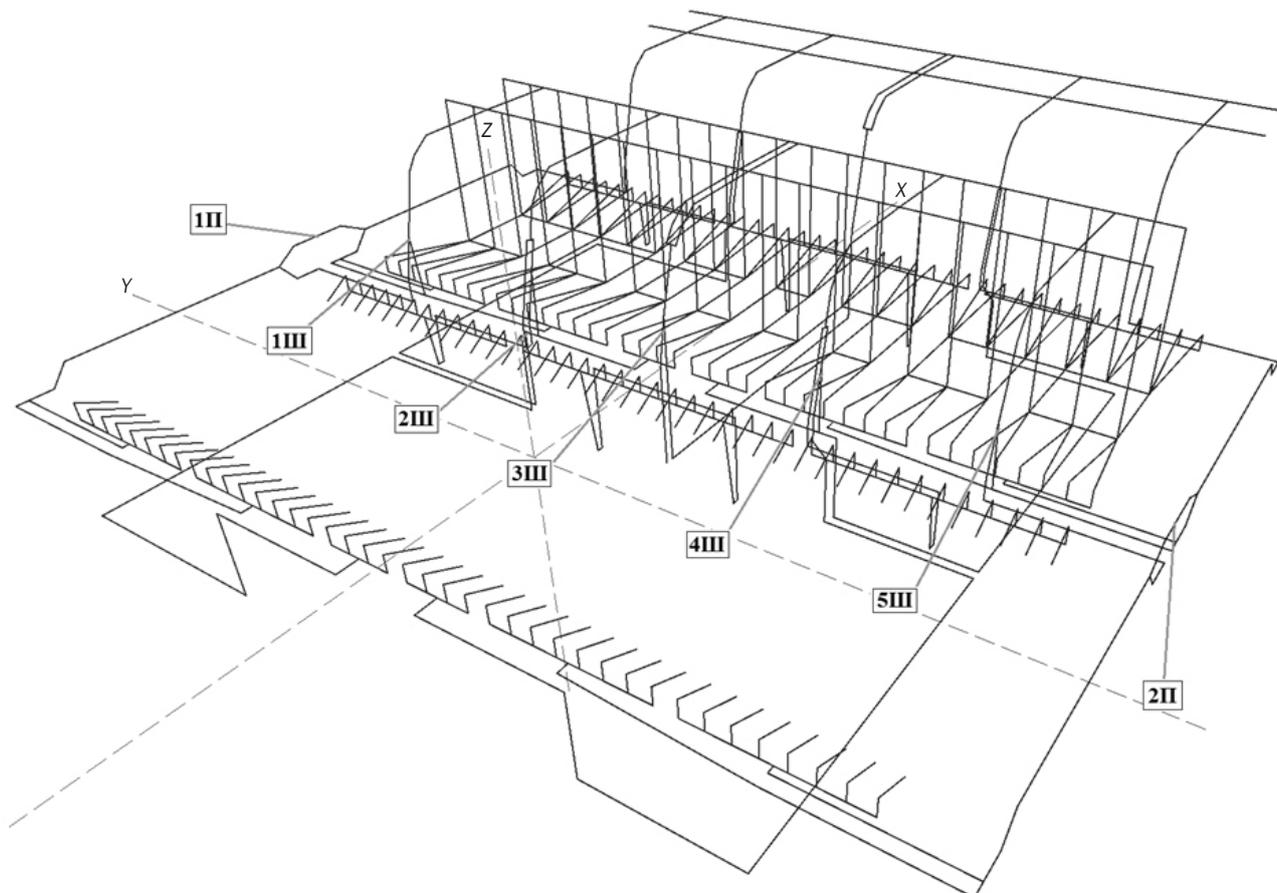
№ катодного блока	I блюмса на выходной стороне электролизера, кА	$\Sigma I$ в катодном блоке, кА
1	0,4	1
	0,6	
2	0,6	1,3
	0,7	
3	0,5	1,3
	0,8	

Продолжение табл. 2

4	0,6	1,3
	0,7	
5	0,6	1,6
	1	
6	0,5	1,7
	1,2	
7	0,2	0,6
	0,4	
8	0,5	1,1
	0,6	
9	0,9	2,4
	1,5	
10	0,8	2,4
	1,6	
11	0,5	2,2
	1,7	
12	0,7	1,9
	1,2	
13	0,7	1,3
	0,6	
14	0,2	0,5
	0,3	
15	0,6	1,5
	0,9	
16	0,5	1,4
	0,9	
17	0,6	1,4
	0,8	
18	0,4	1
	0,6	
19	0,6	1,5
	0,9	
20	-	0,4
	0,4	
<b>ИТОГО</b>		<b>27,8</b>

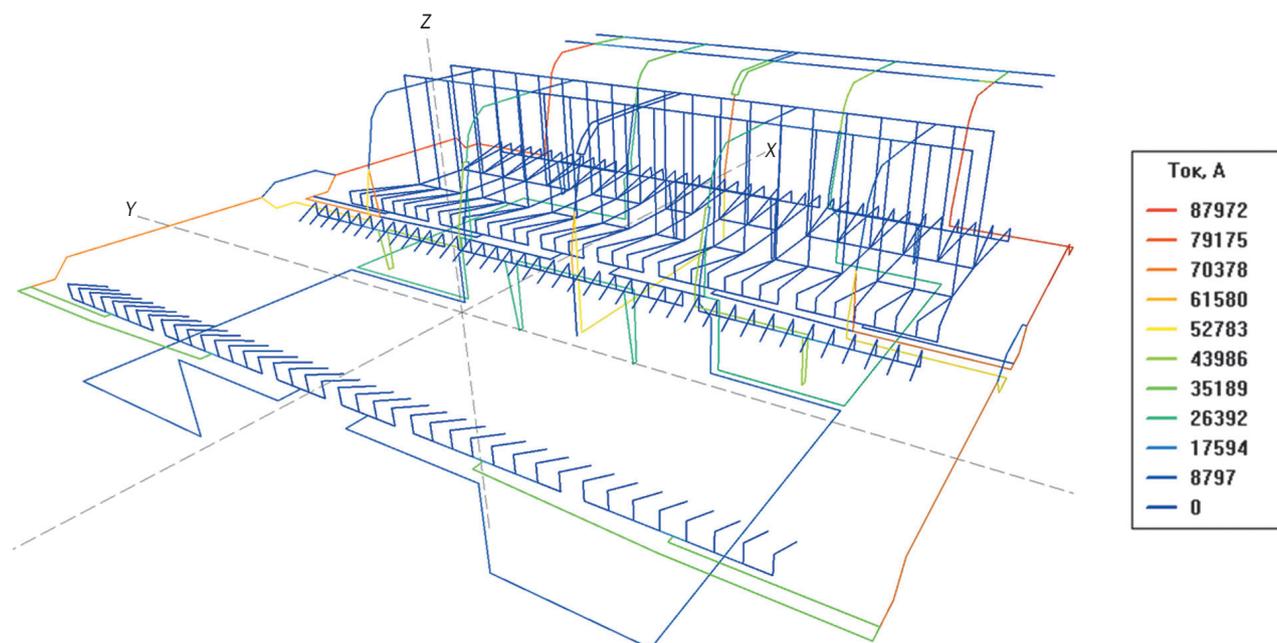
**Таблица 3.** Результаты расчета силы тока в модернизированных плавких вставках и узлах шунтирования перед пуском на электрический обжиг**Table 3.** Calculation results of current strength in upgraded fusible links and shunt units before electrolytic cell start-up for electric firing

Обозначение на схеме	Пояснение	I, кА
1 П	Плавкая вставка 1	11419
2 П	Плавкая вставка 2	5436
3 П	Плавкая вставка 3	3381
4 П	Плавкая вставка 4	5191
5 П	Плавкая вставка 5	11399
1 Ш	Шунт 1	74787
2 Ш	Шунт 2	31509
3 Ш	Шунт 3	54391
4 Ш	Шунт 4	31553
5 Ш	Шунт 5	74629



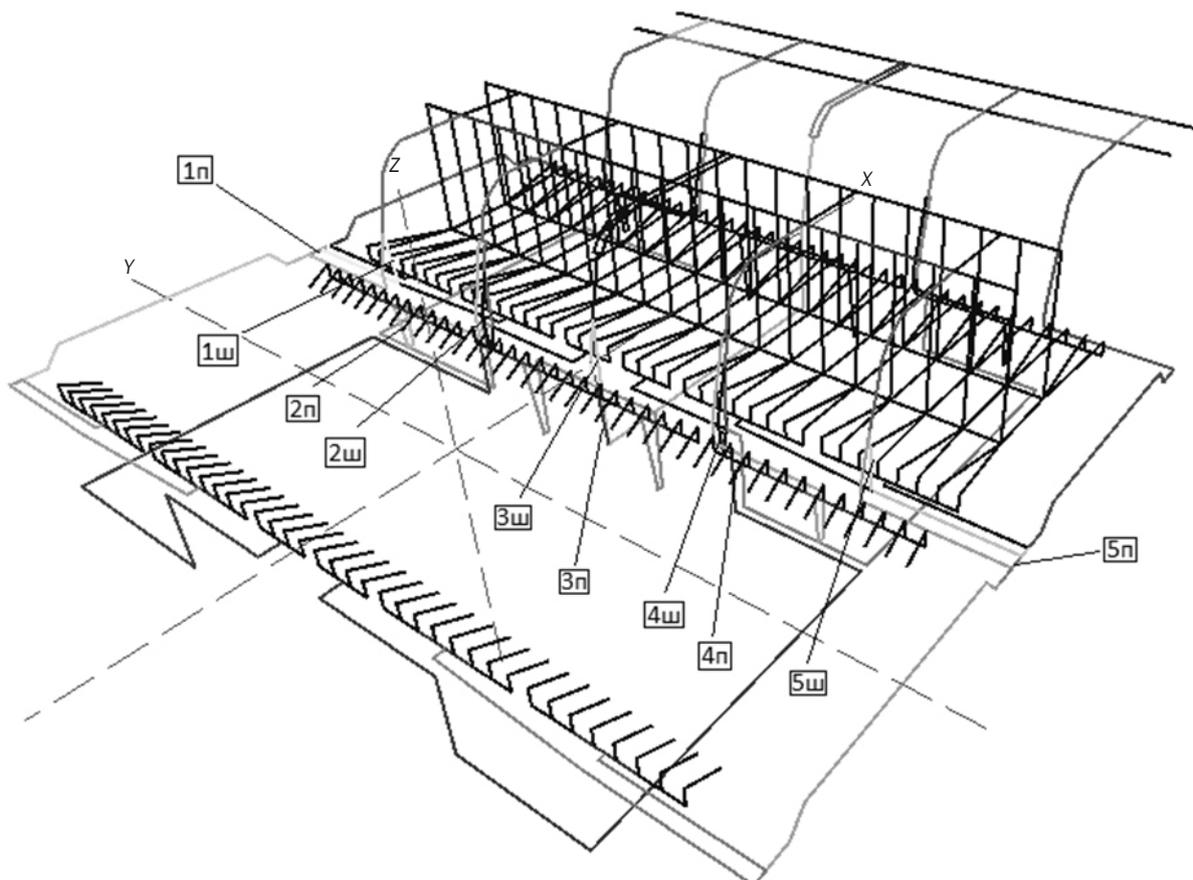
**Рис. 1.** Схема расположения в электрической цепи электролизера стандартных плавких вставок и узлов шунтирования: 1П, 2П – плавкие вставки, установленные на отметке +4 с глухой и с лицевой стороны соответственно; 1Ш-5Ш – узлы шунтирования

**Fig. 1.** Layout diagram of standard fusible links and shunt units in the electrolytic cell electrical circuit: 1П, 2П – fusible links installed at +4 mark on the blind and face sides, respectively; 1Ш-5Ш – shunt units



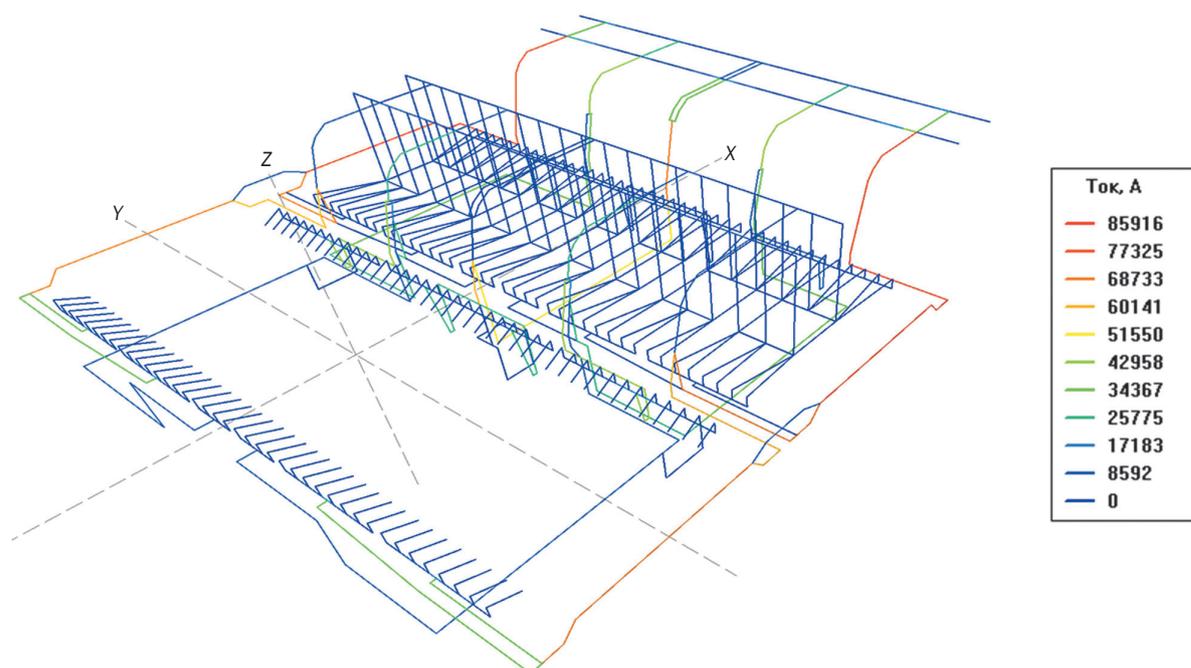
**Рис. 2.** Результаты расчета распределения тока в ошиновке с установленными стандартными плавкими вставками (в электрической цепи плавкие вставки и шунты)

**Fig. 2.** Calculation results of current distribution in a busbar with installed standard fusible links (fusible links and shunts in the electrical circuit)



**Рис. 3.** Схема расположения в электрической цепи электролизера модернизированных плавких вставок и узлов шунтирования: 1П, 5П – плавкие вставки, установленные на отметке +4 с глухой и с лицевой стороны соответственно; 2П-4П – плавкие вставки, установленные на отметке  $\pm 0$ ; 1Ш-5Ш – узлы шунтирования

**Fig. 3.** Layout diagram of the upgraded fuse links and shunt units in the electrolytic cell electrical circuit: 1П, 5П – fusible links installed at +4 mark on the blind and face sides, respectively; 2П-4П – fuse links installed at  $\pm 0$  mark; 1Ш-5Ш – shunt units



**Рис. 4.** Результаты расчета распределения тока в ошиновки с установленными модернизированными плавкими вставками (в электрической цепи плавкие вставки и шунты)

**Fig. 4.** Calculation results of current distribution in busbars with installed upgraded fusible links (fusible links and shunts in the electrical circuit)

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

**Стандартные плавкие вставки.** Испытание стандартных ПВ при постановке ванн на электрический обжиг проводилось на высокоамперном электролизере, работающем на силе тока 330 кА. Время монтажа ПВ на электролизер составило ~ 1 ч. На пуске токовая нагрузка была снижена до 240 кА. Затем проводили разборку и последующую сборку узлов шунтирования с установкой изоляционных пластин. Разборка/сборка узлов шунтирования выполнялась с 3-го (центрального

анодного стояка) и далее последовательно по продвижению к выходам ванны на глухой и лицевой торцы: анодные стояки 2 и 4, а затем, соответственно, 1 и 5.

Время срабатывания ПВ после полного зашунтирования электролизера составило 12 мин с глухой стороны и 13 мин с лицевой.

Смонтированные до и после пуска ПВ на электролизере представлены на рис. 5. Результаты измерения температуры с помощью тепловизора Flir T-430SC представлены на рис. 6. График изменения тока и напряжения электролизера в момент пуска представлен на рис. 7.



a



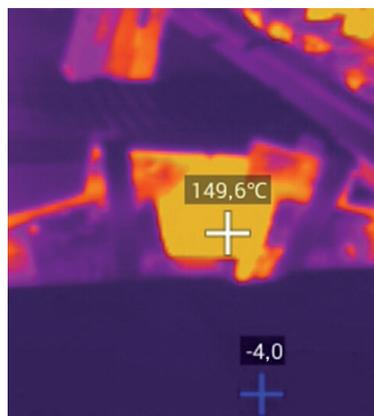
b

**Рис. 5.** Стандартная плавкая вставка, установленная на электролизер: а – до перегорания, б – после перегорания

**Fig. 5.** A standard fusible link installed on the electrolytic cell: a – before failure, b – after failure



a



b

**Рис. 6.** Измерение температуры стандартной плавкой вставки с помощью тепловизора Flir T-430SC: а – до расшунтирования электролизера; б – после расшунтирования последнего анодного стояка

**Fig. 6.** Standard fusible link temperature measurement using the Flir T-430SC thermal imager: a – before electrolytic cell disconnection; b – after the last anode riser disconnection

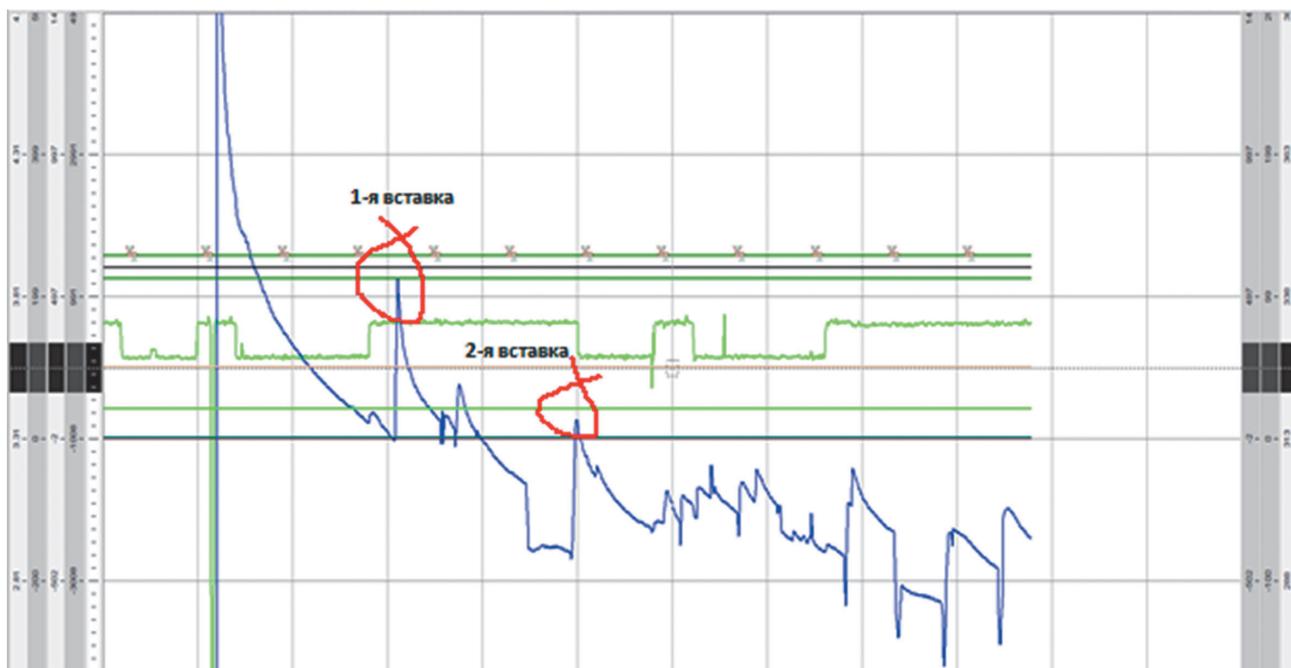


Рис. 7. График изменения тока (ломаная линия зеленого цвета) и напряжения электролизера (ломаная линия синего цвета) в момент пуска

Fig. 7. Graph of current variation (green polyline) and electrolytic cell voltage (blue polyline) at the start-up moment

Промышленное испытание стандартных ПВ со снижением токовой нагрузки до 240 кА показало, что их место установки на ванне выбрано верно, а рассчитанное сечение способствует оптимальному времени перегорания, т.е. 10–15 мин.

Модернизированные плавкие вставки. Испытание модернизированных ПВ было

выполнено на двух высокоамперных электролизерах такой же конструкции, что и при пуске на стандартных ПВ. Время монтажа ПВ на каждый электролизер составило ~ 2,5 ч, в отличие от стандартных плавких вставок. Смонтированные на электролизер ПВ представлены на рис. 8.

После установки ПВ на ванну с использо-



а



б

Рис. 8. Модернизированные плавкие вставки, установленные на электролизер 1: а – на отметке +4; б – на отметке ±0

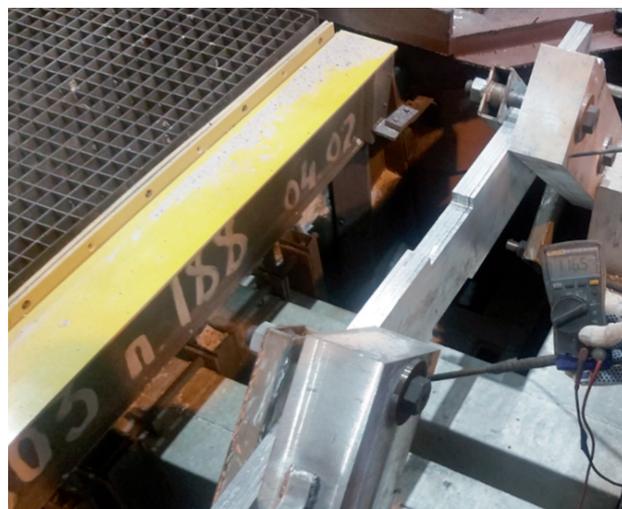
Fig. 8. Upgraded fuse links installed on the electrolytic cell 1: а – at +4 mark; б – at ±0 mark

ванием токовых клещей (рис. 9 а), а также цифрового мультиметра (рис. 9 б) были выполнены измерения тока и перепадов напряжения в узлах сборки. Схема измерений представлена на рис. 10, результаты измерений – в табл. 4 и 5.

При пуске на модернизированных ПВ занижение токовой нагрузки, как уже говорилось ранее, не требовалось, поэтому пуск проходил на токе 330 кА. Разборка и сборка шунтов выполнялись в том же порядке, что и при пуске на стандартных ПВ.



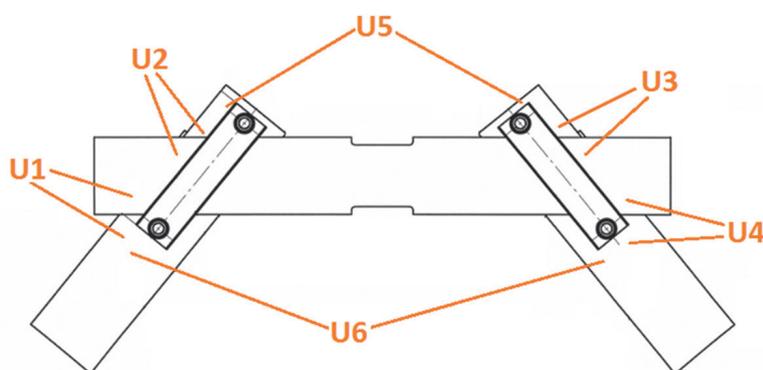
а



б

**Рис. 9.** Фото выполнения измерений на модернизированных плавких вставках: а – измерение тока с помощью токовых клещей; б – измерение перепада напряжения с помощью мультиметра

**Fig. 9.** Images of measurements performed on upgraded fusible links: а – current measurement using current clamps; б – voltage drop measurement using a multimeter



**Рис. 10.** Схема измерений перепадов напряжения в сборных узлах модернизированной плавкой вставкой: U1-U6 – участки измеренных значений перепадов напряжения на смонтированной плавкой вставке

**Fig. 10.** Diagram of voltage drops measurements in the upgraded fusible link assembly units: U1-U6 – sections of the measured voltage drops on the mounted fusible link

**Таблица 4.** Результаты измерений силы тока и перепадов напряжения в узлах сборки плавкой вставкой (U1–U6) на электролизере 1

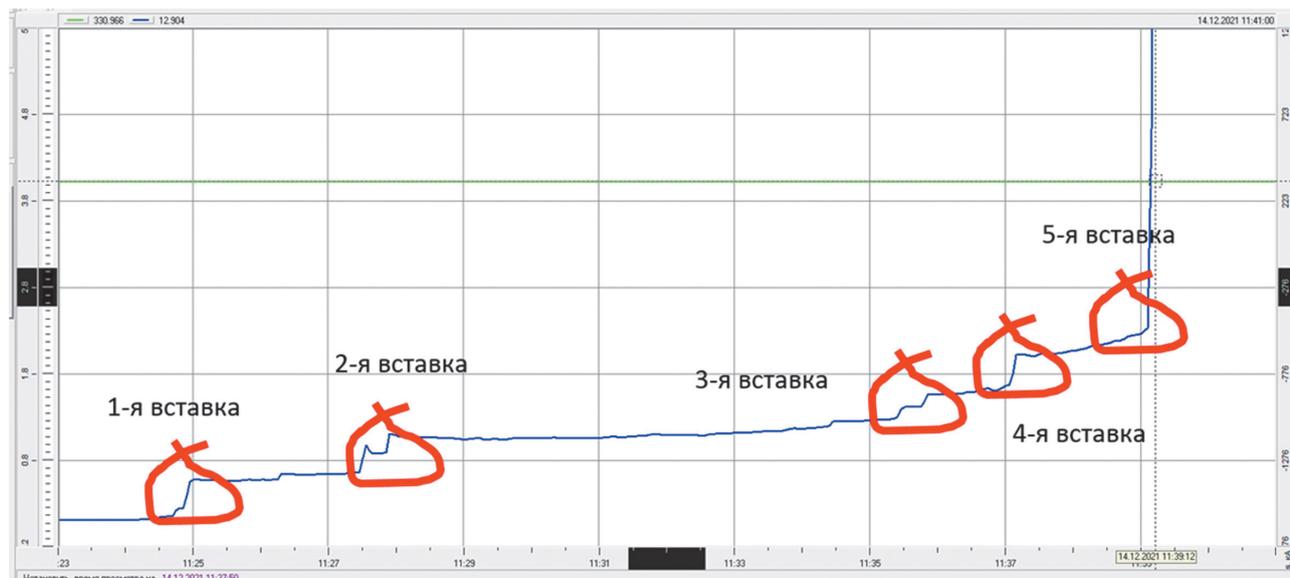
**Table 4.** Measurement results of current strength and voltage drops in the electrolytic cell 1 fusible link assembly units (U1–U6)

№ ПВ	I, кА	Перепады напряжения в узлах сборки плавкой вставкой, мВ					
		U1	U2	U3	U4	U5	U6
1	6,9	65	88	13	65	63	200
2	2,6	112	40	23	28	77	220
3	2,3	49	7	18	51	33	140
4	4,5	63	24	24	18	58	176
5	11,3	15	22	35	17	116	161

**Таблица 5.** Результаты измерений силы тока и перепадов напряжения в узлах сборки плавкой вставки (U1–U6) на электролизере 2

**Table 5.** Measurement results of current strength and voltage drops in the electrolytic cell 2 fusible link assembly units (U1–U6)

№ ПВ	I, кА	Перепады напряжения в узлах сборки плавкой вставки, мВ					
		U1	U2	U3	U4	U5	U6
1	3,1	76	33	85	75	132	281
2	3,5	120	45	27	47	80	255
3	1,7	132	10	19	8	80	255
4	4,9	12	55	30	117	91	233
5	11,2	40	40	51	20	145	202



**Рис. 11.** График изменения напряжения электролизера 2 в момент пуска

**Fig. 11.** Graph of electrolytic cell 2 voltage variation at the start-up moment

График изменения напряжения электролизера 2 в момент пуска представлен на рис. 11.

Согласно данным, представленным на рис. 11, после полного расшунтирования электролизера время перегорания плавких вставок, смонтированных на отметке +4 (ПВ 1 и ПВ2), составило 10 и 12 мин соответственно. Время перегорания ПВ3 -5 (отм. ±0) составило 15 мин с интервалом в 1 мин для каждой ПВ.

Промышленные испытания модернизированных ПВ без снижения токовой нагрузки показали, что место их установки выбрано верно, а рассчитанное сечение способствует оптимальному времени перегорания плавких элементов, т.е. 10–15 мин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика расчета постановки высокоамперного электролизера на электрический обжиг с использованием плавких вставок.

2. Выполнены расчеты и промышленные испытания пуска электрическим обжигом высокоамперного электролизера со стандартными и модернизированными плавкими вставками.

3. Промышленные испытания пуска электролизера на стандартных и модернизированных ПВ без снижения токовой нагрузки показали, что их место установки выбрано верно, а рассчитанное сечение способствует оптимальному времени перегорания плавких элементов, т.е. 10–15 мин.

## Список источников

1. Grjotheim K., Kvande H. Introduction to aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1993. 260 p.
2. Dudin M.N., Voykova N.A., Frolova E.E., Artemieva J.A., Rusakova E.P., Abashidze A.H. Modern trends and challenges of development of global aluminum industry // Metalurgija. 2017. Vol. 56. No. 1-2. P. 255–258.

3. Blais M., Désilets M., Lacroix M. Energy savings in aluminum electrolysis cells: effect of the cathode design // *The Minerals, Metals & Materials Series* / eds. B.A. Sadler. Cham: Springer, 2013. P. 627–631. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch107>.
4. Loginova I.V. Investigation into the question of complex processing of bauxites of the Srednetimanskoe deposit // *Journal of Non-Ferrous Metals*. 2013. Vol. 54. No. 2. P. 143–147. <https://doi.org/10.3103/S1067821213020089>. EDN: RFAJAX.
5. Shoppert A., Valeev D., Loginova I. Novel method of bauxite treatment using electroreductive Bayer process // *Metals*. 2023. Vol. 13. Iss. 9. P. 1502. <https://doi.org/10.3390/met13091502>.
6. 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.
7. Aleksandrov A.V., Aleksandrov V.V. Improving the quality of alumina-containing sinter using water-cooled furnace shell // *Science of Sintering*. 2012. Vol. 44. Iss. 3. P. 281–286. <https://doi.org/10.2298/SOS1203281A>.
8. Зенкин Е.Ю., Гавриленко А.А., Немчинова Н.В. О переработке отходов производства первичного алюминия ОАО «РУСАЛ Братск» // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 3. С. 123–132. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-123-132>.
9. Сторожев Ю., Поляков П., Дектерев А., Казанцев Я. К вопросу очистки анодных газов электролизера с анодом Содерберга // *Экология и промышленность России*. 2019. Т. 23. № 11. С. 15–19. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-11-15-19>. EDN: ОХКВКТ.
10. Zhao Xia, Ma Lei. Hazardous waste treatment for spent pot liner // *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2018. Vol. 108. Iss. 4. P. 042023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/4/042023>.
11. 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>. EDN: YUCHKI.
12. 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. Iss. 6. P. 659–667. <https://doi.org/10.3103/S1067821221060158>. EDN: RHWKMQ.
13. Петровский А.А., Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Корепина Н.А. Использование кека выщелачивания от переработки огнеупорной футеровки демонтированных электролизеров в производстве цемента // *iPolytech Journal*. 2022. Т. 26. № 4. С. 697–708. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-697-708>. EDN: EGMMXU.
14. Пузанов И.И., Волохов И.Н., Быков Р.Ю., Муравьев С.А. Пуск РА-400 на Тайшетском алюминиевом заводе // *Цветные металлы и минералы – 2024: сб. тез. докл. XII Междунар. конгресса (г. Красноярск, 9–13 сентября 2024 г.)*. Красноярск, 2024. С. 213–215.
15. Puzanov I., Zavadyak A., Tretiyakov Y., Morozov M., Gubin A., Platonov V., et al. Electrical resistance preheating of high-amperage cells // *Engineering & Technologies*. 2014. Vol. 7. Iss. 5. P. 552–560.
16. 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](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70). EDN: SIHUYU.
17. 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](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_128). EDN: VADMNZ.
18. Семьянинов Д.М., Кошкарев С. А. Успешная реализация проекта увеличения силы тока на 17 кА до 330 кА на электролизерах ОА-300 на заводе РУСАЛ // *Цветные металлы и минералы – 2024: сб. тез. докл. XII Междунар. конгресса (г. Красноярск, 9–13 сентября 2024 г.)*. Красноярск, 2024. С. 251–253.
19. Поляков П.В. Жизнь алюминиевого электролизера как диссипативной системы: монография. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2018. 190 с.
20. Сорлье М., Ойя Х.А. Катоды алюминиевого электролизера / пер. с англ.; под ред. П.В. Полякова. Красноярск: Версо, 2013. 720 с.
21. Радионов Е.Ю. Расчет магнитогидродинамических параметров работы электролизеров с различным типом катодного кожуха // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 684–693. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-684-693>. EDN: LRHDLJ.
22. Vojarevics V. MHD of aluminium cells with the effect of channels and cathode perturbation elements // *The Minerals, Metals & Materials Series* / eds. B.A. Sadler. Cham: Springer, 2013. P. 609–614. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch104>.
23. Радионов Е.Ю., Немчинова Н.В., Третьяков Я.А. Моделирование магнитогидродинамических процессов в электролизерах при получении первичного алюминия // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 7. С. 112–120. EDN: UBLOMB.

### References

1. Grjotheim K., Kvande H. *Introduction to aluminium electrolysis*. Düsseldorf: Aluminium-Verlag; 1993, 260 p.
2. Dudin M.N., Voykova N.A., Frolova E.E., Artemieva J.A., Rusakova E.P., Abashidze A.H. Modern trends and challenges of development of global aluminum industry. *Metalurgija*. 2017;56(1-2):255-258.

3. Blais M., Désilets M., Lacroix M. Energy savings in aluminum electrolysis cells: effect of the cathode design. In: Sadler B.A. (eds.). *The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer; 2013, p. 627-631. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch107>.
4. Loginova I.V. Investigation into the question of complex processing of bauxites of the Srednetimanskoe deposit. *Journal of Non-Ferrous Metals*. 2013;54(2):143-147. <https://doi.org/10.3103/S1067821213020089>. EDN: RFAJAX.
5. Shoppert A., Valeev D., Loginova I. Novel method of bauxite treatment using electroreductive Bayer process. *Metals*. 2023;13(9):1502. <https://doi.org/10.3390/met13091502>.
6. 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.
7. Aleksandrov A.V., Aleksandrov V.V. Improving the quality of alumina-containing sinter using water-cooled furnace shell. *Science of Sintering*. 2012;44(3):281-286. <https://doi.org/10.2298/SOS1203281A>.
8. Zenkin E.Yu., Gavrilenko A.A., Nemchinova N.V. On RUSAL Bratsk JSC primary aluminum production waste recycling. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(3):123-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-123-132>.
9. Storozhev Yu.I., Polyakov P.V., Dekterev Ar.A., Kazantsev Ya.V. To the question of cleaning anodic gases of the cell with the Soderberg's anode. *Ecology and Industry of Russia*. 2019;23(11):15-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-11-15-19>. EDN: OXKBBT.
10. Zhao Xia, Ma Lei. Hazardous waste treatment for spent pot liner. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2018;108(4):042023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/4/042023>.
11. 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>. EDN: YUCHKI.
12. 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.
13. Petrovskiy A.A., Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Korepina N.A. Use of leaching cake from refractory lining of dismantled electrolyzers in cement production. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):697-708. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-697-708>. EDN: EGMMXU.
14. Puzanov I.I., Volokhov I.N., Bykov R.Yu., Muravyev S.A. Launch of RA-400 at Taishet aluminium smelter. In: *Tsvetnye metally i mineraly – 2024: sbornik tezisov dokladov XII Mezhdunarodnogo kongressa = Non-ferrous metals and minerals: book of abstracts*. 9–13 September 2024, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2024, p. 213-215.
15. Puzanov I., Zavadyak A., Tretiyakov Y., Morozov M., Gubin A., Platonov V., et al. Electrical resistance preheating of high-amperage cells. *Engineering & Technologies*. 2014;7(5):552-560.
16. 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](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70). EDN: SIHUY.
17. 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](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_128). EDN: VADMNZ.
18. Semyaninov D.M., Koshkarev S.A. Successful implementation of a project on increasing amperage by 17 kA up to 330 kA on OA-300 pots at a RUSAL smelter. In: *Tsvetnye metally i mineraly – 2024: sbornik tezisov dokladov XII Mezhdunarodnogo kongressa = Non-ferrous metals and minerals: book of abstracts*. 9–13 September 2024, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2024, p. 251-253.
19. Polyakov P.V. *Life of an aluminum electrolyzer as a dissipative system*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2018, 190 p. (In Russ.).
20. Sørlie M., Øye H.A. Cathodes in aluminium electrolysis, 2013, 720 p. (Russ. ed.: *Katody alyuminievogo elektrolizera*. Krasnoyarsk: Verso; 2013, 720 p.)
21. Radionov E.Yu. Calculation of magnetohydrodynamic electrolyser parameters with various types of cathode shell. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(3):684-693. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-684-693>. EDN: LRHDLJ.
22. Bojarevics V. MHD of aluminium cells with the effect of channels and cathode perturbation elements. In: B.A. Sadler. (eds.). *The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer; 2013, p. 609-614. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch104>.
23. Radionov E.Yu., Nemchinova N.V., Tretiyakov Ya.A. Magnetohydrodynamic processes modeling in electrolyzers at primary aluminum production. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;7:112-120. (In Russ.). EDN: UBLOMB.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ****Радионов Евгений Юрьевич,**

к.т.н.,

заместитель директора департамента по разработке  
ошиновки и измерениям,

ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр»,

660111, г. Красноярск, ул. Пограничников, 37/1, Россия

✉ evgeniy.radionov@rusal.com

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR****Evgeniy Yu. Radionov,**

Cand. Sci. (Eng.),

Deputy Director of the Department for Busbar  
and Measurement Development,

RUSAL Engineering and Technology Center LLC,

37/1, Pogranichnikov St., Krasnoyarsk 660111, Russia

✉ evgeniy.radionov@rusal.com

**Заявленный вклад автора**

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

**Author contribution**

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

**Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The author declares no conflict of interests.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by the author.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 18.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 08.11.2024 г.; принята к публикации 28.11.2024 г.

**Information about the article**

The article was submitted 18.10.2024; approved after reviewing 08.11.2024; accepted for publication 28.11.2024.



Научная статья

УДК 669.054.8

EDN: HXHRZM

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-648-656

## К вопросу получения алюминиевых сплавов из вторичного металлized сырьья

А. Фернандес Пенья<sup>1</sup>, В.Ю. Бажин<sup>2✉</sup>, Д.В. Макушин<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

**Резюме.** Цель – изучение особенностей получения высоколегированного сплава системы Al-Fe-Si-Mn из лома и металлized отходов и определение факторов для оптимального технологического режима плавки и повышения выхода годной продукции при комплексной обработке расплава. В работе использованы различные методы анализов: рентгенофлуоресцентный, спектральный, рентгеноструктурный, дифференциальный термический. Проведен хроматографический и масс-спектрометрический анализ газов, выделяющихся при переплаве алюминиевых отходов, для определения безвозвратных потерь. Данные анализа свидетельствуют о том, что летучие соединения составляют 13–15% от общей массы потерь алюминия во время нагрева и плавления шихты. В результате проведенных тестовых плавов, выполненных с различными алюминиевыми отходами, установлено, что полученные отливки соответствуют некоторым маркам высоколегированных алюминиевых сплавов (например, 3xxx и 8xxx) и в основном относятся к системе Al-Fe-Si-Mn. Определены потери металла во время загрузки шихты в расплав с различной высотой слоя в печи, установлено по наилучшим результатам его рациональное значение, которое составляет 30–40% от массы загружаемой шихты. При внедрении комплексной технологии рафинирования и поэтапной обработки расплава получены образцы с выходом годного от 86 до 88%. Показано, что, согласно проведенному анализу химического состава, отливки содержат минимальное количество неметаллических включений (SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>) при допустимом содержании водорода (0,08–1,0 см<sup>3</sup>/100 г). Изучение структурных особенностей показало, что все образцы характеризуются сложной разветвленной структурой с наличием интерметаллических фаз типа AlFe(Si)Mn, которые имеют характерный вид, известный как «китайский шрифт», и достигают размеров от 70 до 120 мкм. Структура отливок в целом характеризуется однородностью и равномерным распределением агломератов из наноразмерных интерметаллидов в алюминиевой матрице, что дает возможность дальнейшего получения литых заготовок и прокатных изделий широкого спектра назначений.

**Ключевые слова:** вторичная металлургия, алюминиевые отходы, высоколегированный сплав, выход годной продукции, структура, интерметаллиды

**Для цитирования:** Фернандес Пенья А., Бажин В.Ю., Макушин Д.В. К вопросу получения высоколегированных алюминиевых сплавов из вторичного металлized сырьья // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 648–656. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-648-656>. EDN: HXHRZM.

## METALLURGY

Original article

## Valuable aluminum alloys obtained from secondary metallized raw materials

Alejandro Fernandez Penya<sup>1</sup>, Vladimir Yu. Bazhin<sup>2✉</sup>, Dmitry V. Makushin<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

**Abstract.** In this work, we aim to obtain a high-alloy product of the Al-Fe-Si-Mn system from scrap and metallized waste, as well as to determine the optimal technological mode of melting for increasing the yield of finished products during complex processing of the melt. The study involved the following methods: X-ray fluorescence (XRF), spectral, X-ray structural, and differential-thermal analysis. Chromatographic and mass-spectrometric analysis of gases released during the remelting of aluminum waste was carried out to determine irrecoverable losses. Analysis data indicate that volatile compounds account for 13–15% of the total mass of aluminum lost during heating and melting of the charge. As a result of the test melts carried out with various aluminum wastes, the obtained castings were shown to correspond to some grades of high-alloy aluminum alloys (for example, 3xxx and 8xxx) mainly belong-

ing to the Al-Fe-Si-Mn system. The metal losses during loading of the charge into the melt at various layer heights in the furnace were determined. Its rational value was established based on the best results, representing 30–40% of the mass of the loaded charge. The implementation of a comprehensive technology for refining and step-by-step processing of the melt produced samples with a yield of 86 to 88%. According to the conducted analysis of the chemical composition, the castings contain a minimal quantity of non-metallic inclusions ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ) with an acceptable hydrogen content ( $0.08\text{--}1.0\text{ cm}^3/100\text{ g}$ ). A study of the structural features characterized all samples as having a complex dendritic structure with the presence of intermetallic phases of the  $\text{AlFe}(\text{Si})\text{Mn}$  type, which have a characteristic appearance known as "Chinese script" and reach sizes from 70 to 120  $\mu\text{m}$ . The structure of the castings, which is generally characterized by its homogeneity and the uniform distribution of agglomerates of nanosized intermetallic compounds in the aluminum matrix, is suitable for obtaining cast blanks and rolled products for a wide range of purposes.

**Keywords:** secondary metallurgy, aluminum waste, superalloy, annual output, structure, intermetallic compounds

**For citation:** Fernandes Penya A., Bazhin V.Yu., Makushin D.V. Valuable aluminum alloys obtained from secondary metallized raw materials. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):648-656. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-648-656>. EDN: HXHRZM.

## ВВЕДЕНИЕ

В современных промышленных условиях одним из важнейших приоритетов является достижение высокой энергоэффективности и минимизация материальных затрат при выпуске изделий с высокой добавленной стоимостью [1–4]. Рост потребности в переработке вторичных алюминиевых сплавов объясняется увеличением объема сбора и переработки отходов, включая металлическую упаковку и прочие изделия из алюминия<sup>4</sup> [5]. В эту категорию отходов попадают не только банки для напитков [7], но и предметы обихода, такие как кухонные принадлежности, оконные профили и окрашенные детали автомобилей, что делает такие материалы пригодными для повторного использования в аналогичных продуктах [8, 9]. Однако переработка цветных металлов, особенно алюминия, значительно отстает от уровня переработки черных металлов. В ряде стран, например, на Кубе, ограниченные технические возможности не позволяют организовать переработку металлолома на местном уровне, и большая часть металлического сырья отправляется на переплавку в другие страны, что повышает затраты на логистику и снижает эффективность процесса. Основная проблема заключается в значительном уровне загрязнения лома цветных металлов, в том числе красками, лаками и защитными покрытиями, требующими дополнительной очистки и подготовки [10, 11].

Для качественной переработки алюминиевого лома с лакокрасочными покрытиями

требуются усовершенствованные технологии рафинирования и специализированные плавильные установки [12]. На сегодняшний день многие предприятия, перерабатывающие металлосодержащую продукцию, используют отражательные печи для переплавки отходов [13]. Однако этот метод не учитывает экологические и экономические аспекты переработки окрашенного лома, что влияет на рентабельность и качество продукции. Кроме того, в отражательных печах, в отличие от более современных роторных агрегатов<sup>5</sup> [14–16], практически невозможно эффективно регулировать атмосферу внутри печи, что снижает контроль над процессом и ухудшает качество конечного продукта [17].

Высокая эффективность отражательных печей достигается только при загрузке брикетированного лома непосредственно в расплав, известный как слой «болото» [18]. Это условие ограничивает возможности получения сплавов из шихты с лакокрасочными покрытиями, поскольку часть красок улетучивается при загрузке и нагреве шихты, а другая может вызывать термические реакции в расплаве алюминия, особенно на его поверхности. Даже многоступенчатое рафинирование и дегазация расплава не могут полностью предотвратить образование неметаллических и оксидных включений, что отрицательно сказывается на качестве получаемых алюминиевых отливок [19].

Когда перерабатываемый лом содержит значительные примеси в виде красок и дру-

<sup>4</sup>Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я. Экология и утилизация отходов при производстве алюминия: учеб. пособ. 2-е изд. М.: Флинта, 2005. 268 с. EDN: QMZQIR.

<sup>5</sup>Новичков С.Б. Теория и практика переработки отходов алюминия в наклонных печах: дис. д-ра техн. наук: 05.16.02. Иркутск, 2008. 333 с. EDN: NJEPML.

гих органических соединений, необходимо создать условия для удаления этих покрытий и избежать потерь металла вследствие сгорания органики<sup>6</sup> [20, 21]. Оптимизация процесса плавки требует обеспечения в печи избытка воздуха для полного выгорания органических компонентов, особенно на начальной стадии постепенного нагрева шихты, которые, в свою очередь, могут резко воспламениться при загрузке в горячую зону горелки [22]. Наиболее подходящими установками для переработки алюминиевого лома являются роторные барабанные печи наклонного типа (РНП), способные поддерживать контролируемую атмосферу, что способствует повышению качества и снижению технологических потерь на всех стадиях плавки<sup>2</sup> [23]. Кроме того, такие печи позволяют автоматизировать управление процессом, обеспечивая надежный контроль температурного режима при снижении доли вредных выбросов, что отвечает современным экологическим требованиям.

Настоящее исследование нацелено на создание литых заготовок из алюминиевого сплава заданного состава, получаемых путем вторичной переработки алюминиевой упаковки и банок для напитков. Экспериментальные результаты подтверждают преимущества перехода от отражательных печей к РНП для переработки вторичного алюминийсодержащего сырья с лакокрасочными покрытиями, что открывает перспективы для повышения энергоэффективности, улучшения качества продукции и снижения негативного воздействия на окружающую среду. В данной работе были интерпретированы ранее полученные результаты в свете современных представлений по переработке лома цветных металлов.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

**Спектроскопическое исследование образцов после плавки.** В ходе работы было проведено три плавки алюминиевого лома (мелкого скрапа), покрытого красками и

лаками, с использованием в шихте очищенных, минимально загрязненных органическими соединениями образцов. Загруженная шихта размещалась в графитовом тигле и направлялась в трехсекционный плавильный агрегат, включающий плавильную печь, миксер и литейное устройство. Экспериментальные лабораторные плавки позволили определить влияние предварительной термической обработки на выход годного продукта – алюминиевого сплава. После плавления и литья образцов № 1–3 в формы отбирались аншлифы для спектрометрического анализа. Автоматизированный рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-6000 (Япония) использовался для определения фазового состава, что позволило выявить содержание примесей и определить качественный состав отливок. Спектральный анализ подтвердил наличие более 20 элементов, присутствующих в различных соотношениях в виде соединений с основными компонентами. Полученные отливки соответствуют стандартам по EN AW для некоторых марок высоколегированных алюминиевых сплавов (например, 3XXX и 8XXX) и в основном относятся к системе Al-Fe-Si-Mn. Содержание Mn в отливках изменялось в интервале от 0,9 до 1,5 масс. %.

**Хроматографический и масс-спектрометрический анализ газов, выделяющихся при переплавке алюминиевого лома.** Важным этапом анализа стало исследование выделяющихся при плавке газов. Пробы загрязненного органическими соединениями алюминиевого лома массой 15 г подвергались нагреву до 250 и 490 °С для оценки состава газов, образующихся в результате термического разложения органических покрытий и иных загрязнений. Подготовленный алюминиевый лом (скрап) не подвергался брикетированию или прессованию, что позволило воссоздать реальные условия выделения газообразных выбросов, начиная с этапа сушки до плавления. Мелкоизмельченный алюминий размещался в стеклянной ка-

**Таблица 1.** Интервалы содержания элементов в отливках, масс. %

**Table 1.** Element percentage content in castings, wt%

Al	Mn	Fe	Si	Cu	Zn	Примеси
96,7–97,1	1,1–1,5	до 0,6	до 0,5	0,1–0,3	до 0,1	0,14

<sup>6</sup>Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я. Металлургия вторичного алюминия: учеб. пособ. М.: Наука, 1998. 112 с.

пильной трубке, расположенной в горизонтальном положении в печи. Для регистрации выделяющихся летучих соединений в течение 20 мин через трубку пропусклся поток гелия объемом 1,5 л. Выделенные соединения осаждались в трубке, содержащей многослойный угольный фильтр. Десорбция проводилась в специальном устройстве Tekmar 6000, сопряженном с масс-спектрометром Pfeiffer Vacuum Termostar GSD301T3 (Германия). Зарегистрированные масс-спектры летучих соединений в период нагрева шихты и проведенный анализ состава выделенных летучих соединений показали, что в большинстве это  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ , а также пары  $\text{HCl}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Поскольку лак и краски представляют собой растворы смол (натуральных или синтетических) в различных растворителях (углеводороды, кетоны (ацетон, метилэтилкетон, ацетаты и др.)), то именно эта группа соединений выделяется из шихты в первый период времени при температуре 350–400 °С.

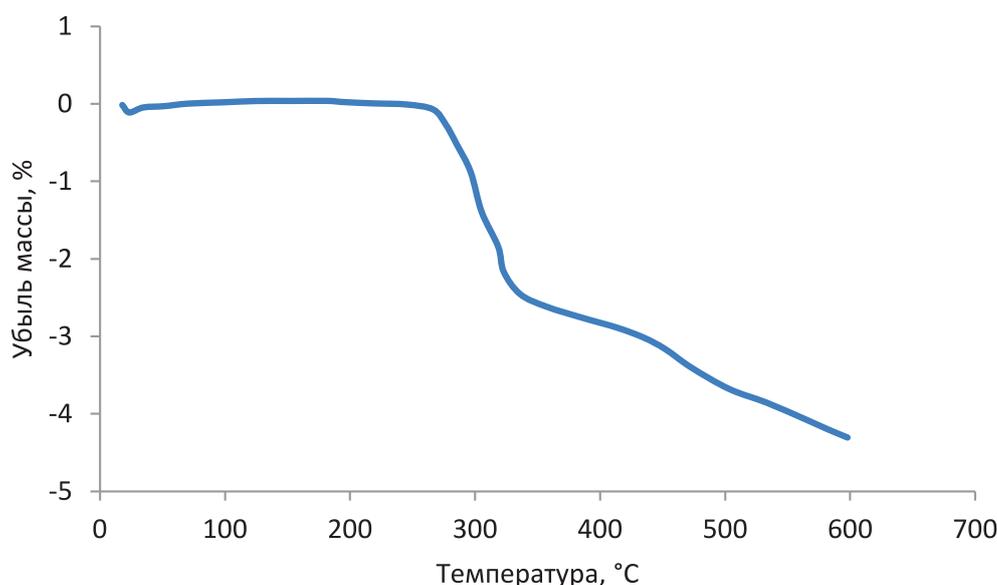
Данные термогравиметрического анализа показали, что максимальная интенсивность выделения летучих соединений из органики наблюдалась при температуре 150–320 °С (рис. 1). Эти данные приводились в ранних исследованиях авторов [24], но были уточнены в этой работе.

Из полученных данных термогравиметрического анализа видно, что показатель убыли массы после 320 °С резко снижается (почти в два раза), что связано с удалением

влаги на стадии нагрева, и при и газообразных продуктов при сгорании лакокрасочного покрытия. Результаты термогравиметрического и масс-спектрометрического анализов свидетельствуют о том, что летучие соединения составляют 13–15% от общей массы потерь алюминия.

**Расчет высоты слоя металла и выход годного металла.** Алюминиевые отливки из алюминиевого скрапа, полученные в ходе экспериментов, подвергались химическому и металлографическому анализам. На подготовительном этапе шихтовые материалы, представлявшие собой 1,5 кг алюминиевых отходов (в виде измельченных упаковок для напитков), тщательно перемешивались и взвешивались для каждой плавки (образцы № 1–3). Для точного контроля массы использовались аналитические весы с диапазоном измерений от 5 до 1000 г и погрешностью в 0,1 г. Плавка проводилась в интервале температур 750–780 °С; в процессе добавлялся флюс ( $\text{NaCl} + \text{NaAlF}_4$ ) в количестве 20 г для рафинирования расплава. Затем расплав тщательно перемешивался для отбора проб с поверхности химического анализа. Полученный сплав заливался в круглые формы, и после охлаждения отливки взвешивались для расчета выхода годного (ВГ) металла согласно формуле (1):

$$ВГ = \frac{M(\text{отливки})}{M(\text{навески})} \cdot 100\%. \quad (1)$$



**Рис. 1.** Данные термогравиметрического анализа при нагреве шихты из алюминиевого скрапа  
**Fig. 1.** Thermogravimetric analysis data during heating of aluminum scrap charge

**Таблица 2.** Показатели эксперимента по изучению влияния высоты слоя металла на выход годного металла  
**Table 2.** Experimental results of studying the effect of metal layer height on yields

М(слой Al), г	М(навеска), г	М(шлак), г	М(остаток), г	М(литье), г	Выход, %
0	100	17,9	4,3	76,7	75,7
76,7	100	22,3	4,2	150,1	83,9
159,1	100	25,1	7,2	217,7	86,0
285,5	100	36,9	4,8	345,1	89,2
348,2	100	30,7	5,2	409,0	92,9

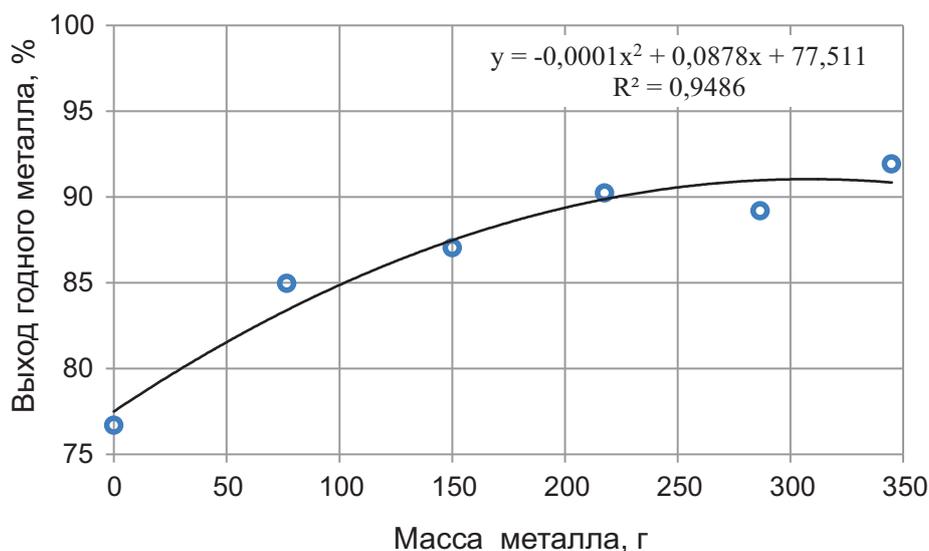
В результате проведенных плавов ВГ металла составил 75,5% для отливки № 1, 79,2% для отливки № 2 и 80,1% для отливки № 3. Для повышения выхода металла при промышленной переработке алюминиевой упаковки целесообразно применять предварительные операции дробления и отжига с последующим прессованием лома в «брикеты» [25, 26]. В дополнение к прессованию: значительное увеличение выхода обеспечивается загрузкой лома непосредственно в расплавленный слой металла, так называемое «болото», что способствует его равномерному нагреву и плавлению [27].

На основе данных предыдущих плавов в аналогичных условиях проведены дополнительные эксперименты, направленные на оценку влияния высоты слоя металла (незавершенное производство) на ВГ. В ходе каждого опыта отбирались образцы массой 100 г алюминиевого сплава, при этом высота слоя расплава в тигле изменялась для точной оценки влияния этого параметра на итоговые значения исследуемого показателя.

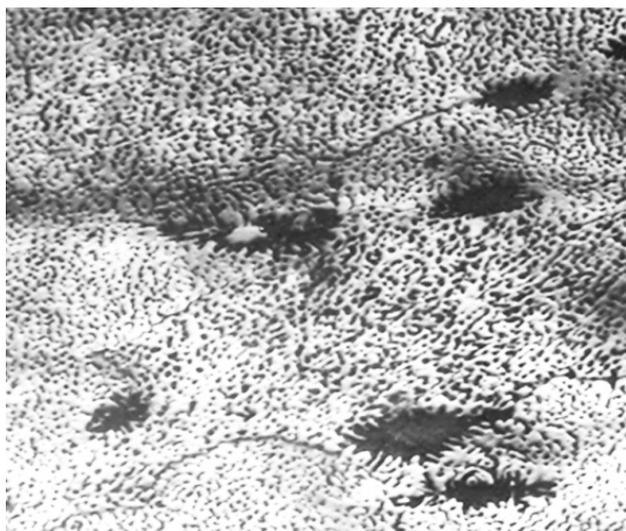
Результаты показали, что увеличение высоты металлического слоя способствует повышению ВГ металла за счет улучшения теплопередачи и сокращения потерь на образование оксидных включений (табл. 2 и рис. 2). Эти данные также были уточнены после серии проведенных дополнительных опытов.

Определены потери металла во время загрузки шихты в расплав с различной высотой слоя в печи, и установлено (по наилучшим показателям) его рациональное значение, которое составляет 30–40% от массы загружаемой шихты. Расчетные значения имеют сходимость с уточненными экспериментальными результатами (рис. 3).

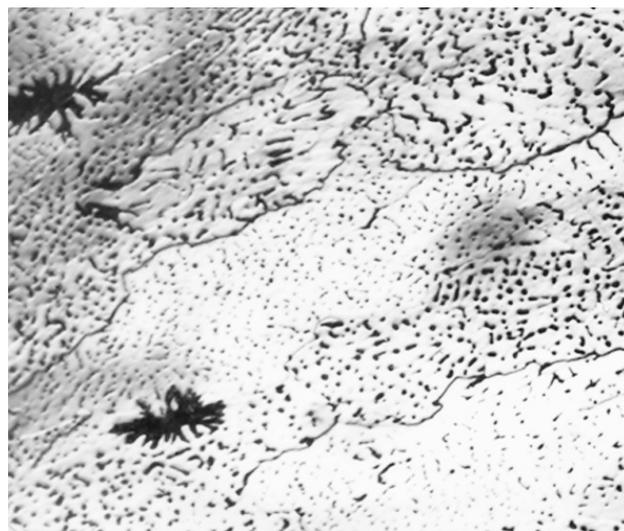
Для практического применения рекомендуется осуществлять плавку мелкозагрязненного лома и алюминиевой стружки в РНП с возможностью контроля атмосферы и поддержания определенной высоты слоя расплава. При правильном выборе температурного режима, включающем оптимальные скорости нагрева и плавления, исполь-



**Рис. 2.** Влияние высоты слоя металла на выход годного продукта  
**Fig. 2.** Metal layer height vs metal yield



a



b

**Рис. 3.** Микроструктура литого образца алюминиевого сплава: а – при содержании железа 0,65%; б – при содержании железа 0,85%

**Fig. 3.** Microstructure of an aluminum alloy cast sample: a – 0.65% iron content; b – 0.85% iron content

зование данного типа печей обеспечивает повышение выхода готового металла. Такие условия создают более эффективное распределение тепла и минимизируют потери, связанные с окислением, что делает технологию предпочтительной для переработки загрязненного алюминиевого вторичного сырья.

**Металлографическое исследование литых образцов.** Как известно, наличие различных включений в алюминии и его сплавах может ухудшать их свойства [28, 29]. В связи с этим необходимо изучить микроструктуру экспериментальных образцов. Для анализа микроструктуры отливки из каждой партии были подготовлены путем разлива расплава в круглые огнеупорные формы, с последующей резкой вдоль осевой линии. После этого образцы подвергались полировке и травлению в 12%-м растворе ортофосфорной кислоты на протяжении восьми минут, что позволило более четко визуализировать структурные особенности отливки. Исследование структуры образцов проводилось методом растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа с использованием микроскопа JSM-6460 LV (JEOL, Япония) в сочетании с аналитическим модулем с приставкой INCA (Великобритания), что обеспечило высокую точность в выявлении структурных и фазовых особенностей. На рис. 3 представлена типичная микрострукту-

ра отливок при различном содержании железа в алюминиевом сплаве.

На рис. 3 видны значительные различия в микроструктуре образцов при различном содержании железа. С повышением Fe и количества интерметаллических фаз с первичной игольчатой структурой (темного цвета) локально изменяется структура самой алюминиевой матрицы. При этом, в некоторых местах наблюдается смещение и дробление эвтектических включений Al-Si (рис. 3 б), что определяется наличием и влиянием уже очагов крупных устойчивых игольчатых интерметаллических фаз типа  $Al_3Fe$  и мелких метастабильных фаз  $FeSiAl_5$  с размерами 50–70 нм.

Все образцы характеризуются сложной разветвленной структурой интерметаллических фаз типа  $AlFe(Si)Mn$ , которые имеют характерный вид, известный как «китайский шрифт», и достигают размеров от 70 до 120 мкм. Частично наблюдаются локальные очаги дендритной структуры, что связано с процессом кристаллизации, происходившим в условиях жидко-твердого состояния в кристаллизаторе. Наличие дендритов может повышать прочность сплава, однако их структура также способствует формированию междендритной пористости, которая в сочетании с оксидными пленками различной конфигурации может снижать механические свойства отливки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований показали, что при термической обработке алюминиевого лома, покрытого краской и лаком, в температурном диапазоне 250–450 °С с его поверхности выделяется значительное количество летучих соединений, представляющих собой продукты разложения органических покрытий. Быстрый нагрев шихты приводит к самовоспламенению (горению) лакокрасочных покрытий, что, возможно, связано с очаговыми термическими реакциями. Результаты термогравиметрического и масс-спектрометрического анализов свидетельствуют о том, что летучие соединения составляют 13–15% от общей массы потерь алюминия, что обуславливает необходимость улучшения технологических условий плавания.

Анализ химического состава показал, что состав отливок из переработанного лома близок по параметрам к сплавам марок Зххх и 8ххх, с содержанием марганца в пределах 1,1–1,5% и алюминия на уровне 96,3–97,9%. Эти характеристики позволяют использовать отливки в широком спектре литья, при этом ВГ металла составил от 75,5 до 80,1%, что подтверждается данными по отдельным отливкам.

Микроструктурное исследование образцов выявило наличие крупных иглообразных интерметаллических фаз, которые снижают пластичность и могут способствовать об-

разованию пористости при недостаточной очистке расплава. В частности, фазы устойчивого типа  $Al_3Fe$  и метастабильного типа  $FeSiAl_5$ , обнаруженные в структуре, указывают на необходимость более тщательной подготовки шихты и контроля микроструктуры при переработке лома с красками и лаками. Учитывая выявленные особенности, рекомендуется перед плавлением подвергать шихту предварительному отжигу для удаления органических примесей и обеспечения более равномерного нагрева алюминиевой шихты.

Для увеличения выхода годного металла и улучшения качества отливок важно применять плавку в условиях регулируемой атмосферы в РНП, где возможно поддержание постоянной температуры и удаление оксидов с поверхности расплава. Поддержание заданной атмосферы предотвращает окисление алюминия и способствует более стабильному процессу плавки. Согласно проведенным научным исследованиям, последовательное рафинирование и дегазация существенно снижают количество включений и улучшают качество сплава. Дополнительно рекомендуется установка пеночерамических фильтров для фильтрации расплава, что позволит удалять мельчайшие оксидные и неметаллические включения, повышая чистоту и механические свойства конечных отливок [30].

## Список источников

1. Litvinenko V.S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector // *Natural Resources Research*. 2020. Vol. 29. № 3. P. 1521–1541. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09568-4>. EDN: WGABFS.
2. Гусева Е.Н. Использование вторичных минеральных ресурсов цветной металлургии – важный резерв ресурсосбережения // *Записки Горного института*. 2003. Т. 155. С. 194–197.
3. Ларичкин Ф.Д. Минерально-сырьевые ресурсы в экономике России // *Записки Горного института*. 2008. Т. 179. С. 9–13. EDN: LHPXML.
4. Горланов Е.С., Леонтьев Л.И. Направления технологического развития алюминиевых электролизеров // *Записки Горного института*. 2024. Т. 266. С. 246–259. EDN: PYSEVM.
5. Ünlü N., Drouet M.G. Comparison of salt-free aluminum dross treatment processes // *Resources, Conservation and Recycling*. 2002. Vol. 36. Iss. 1. P. 61–72. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00010-1).
6. Raabe D. The materials science behind sustainable metals and alloys // *Chemical reviews*. 2023. Vol. 123. Iss. 5. P. 2436–2608. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00799>.
7. Lavoie S., Dube G. A salt-free treatment of aluminium dross using plasma heating // *JOM*. 1991. P. 54–55. <https://doi.org/10.1007/BF03220144>.
8. Макаров Г.С. Мировые тенденции в области переработки и применения вторичного алюминия // *Технология легких сплавов*. 2004. № 1. С. 25–30.
9. Meshram A., Singh K.K. Recovery of valuable products from hazardous aluminum dross: a review // *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 130. P. 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.026>.
10. Gaustad G., Olivetti E., Kirchain R. Improving aluminum recycling: a survey of sorting and impurity removal technologies // *Resources, Conservation and Recycling*. 2012. Vol. 58. P. 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.010>.

11. Domagala J., Haag P., Niehoff T., Schmitz C. Handbook of aluminium recycling: mechanical preparation, metallurgical processing, heat treatment / eds. C. Schmitz. Essen: Vulkan-Verlag, 2014. 536 p.
12. Capuzzi S., Timelli G. Preparation and melting of scrap in aluminum recycling: a review // *Metals*. 2018. Vol. 8. Iss. 4. P. 249. <https://doi.org/10.3390/met8040249>.
13. Пат. № 2529348, Российская Федерация, С22В 7/00, F27В 3/00. Отражательная печь для переплава алюминиевого лома / В.А. Трусов; заявитель и патентообладатель В.А. Трусов. Заявл. 17.05.2013; опубл. 27.09.2014.
14. Rovin S.L., Kalinichenko A.S., Rovinc L.E. Recycling of dispersed metal wastes in rotary furnaces // *Journal of Casting & Materials Engineering*. 2019. Vol. 3. No. 2. P. 43–49. <http://doi.org/10.7494/jcme.2019.3.2.43>.
15. Ровин С.Л. Перспективы применения ротационных печей. Рециклинг металлоотходов // *Литейное производство и металлургия: сб. тр. XXV Междунар. науч.-техн. конф. (г. Минск, 18–19 октября 2017 г.)*. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2017. P. 65–71.
16. Drouet M.G., Meunier J., Laflamme C.B., Handfield M.D., Biscaro A., Lemire C. A rotary arc furnace for aluminium dross processing // *Third International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials (Alabama, 12–15 November 1995)*. Alabama: The Mineral, Metals and Materials Society, 1995. P. 803–812.
17. Kos B. Direct dross treatment by centrifuging of hot dross // *Aluminium*. 2000. Vol. 76. P. 35–36.
18. Wibner S., Antrekowitsch H., Meisel T.C. Studies on the formation and processing of aluminium dross with particular focus on special metals // *Metals*. 2021. Vol. 11. Iss. 7. P. 1108. <https://doi.org/10.3390/met11071108>.
19. Wallace G. 4 - Production of secondary aluminium // *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*. 2011. P. 70–82. <https://doi.org/10.1533/9780857090256.1.70>.
20. Raabe D., Ponge D., Uggowitzer P.J., Roscher M., Paolantonio M., Liu Chuanlai, et al. Making sustainable aluminum by recycling scrap: the science of “dirty” alloys // *Progress in Materials Science*. 2022. Vol. 128. P. 100947. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100947>.
21. Drouet M.G., Leroy R.L., Tsantrizos P.G. Drosrite salt-free processing of hot aluminium dross // *TMS Fall Extraction and Process, Metallurgy Meeting (Pittsburgh, Pennsylvania, 22–25 October 2000)*. Pittsburgh, Pennsylvania: The Minerals, Metals and Materials Society, 2000. P. 1135–1145.
22. Kolbeinsen L. The beginning and the end of the aluminium value chain // *Matériaux & Techniques*. 2020. Vol. 108. Iss. 5-6. P. 506. <https://doi.org/10.1051/mattech/2021008>.
23. Новичков С.Б. Закономерности плавки алюминиевого шлака в роторной наклонной печи // *Цветные металлы*. 2004. № 1. С. 67–70.
24. Ибрагимов В.Э., Гарсия Л.М., Бажин В.Ю. Плавка тонкостенного лома с лакокрасочными покрытиями для получения алюминиевого сплава // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. № 2. С. 14–17. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.44.068>.
25. Shinzato M.C., Hypolito R. Solid waste from aluminum recycling process: characterization and reuse of its economically valuable constituents // *Waste management*. 2005. Vol. 25. Iss. 1. P. 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.08.005>.
26. Wong David S., Lavoie P. Aluminum: recycling and environmental footprint // *JOM*. 2019. Vol. 71. № 9. P. 2926–2927. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03656-9>.
27. Жолнин А.Г., Новичков С.Б. Механизм перехода алюминия из шлака в «болото» при плавке алюминиевых отходов в роторных печах // *Цветная металлургия*. 2003. № 1. С. 22–27.
28. Nemchinova N.V., Belskii S.S., Vlasov A.A. Studying aluminum alloy defects // *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 316. P. 353–358. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.353>.
29. Немчинова Н.В., Тютрин А.А. Металлографическое исследование образцов алюминиевых рондолой // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 3. С. 124–128. EDN: TNIQRV.
30. Фомин Б.А., Москвитин В.И., Махов С.В. Металлургия вторичного алюминия: монография. М.: ЭКОМЕТ, 2004. 238 с. EDN: QMZMIB.

### References

1. Litvinenko V.S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Natural Resources Research*. 2020;29(3):1521-1541. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09568-4>. EDN: WGABFS.
2. Guseva E.N. Using secondary mineral resources of non-ferrous metallurgy is an important reserve for resource conservation. *Journal of Mining Institute*. 2003;155:194-197. (In Russ.).
3. Larichkin F.D. Mineral resources in the Russian economy. *Journal of Mining Institute*. 2008;179:9-13. (In Russ.). EDN: LHPXML.
4. Gorlanov E.S., Leont'ev L.I. Directions in the technological development of aluminium pots. *Journal of Mining Institute*. 2024;266:246-259. (In Russ.). EDN: PYSEVM.
5. Ünlü N., Drouet M.G. Comparison of salt-free aluminum dross treatment processes. *Resources, Conservation and Recycling*. 2002;36(1):61-72. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00010-1).
6. Raabe D. The materials science behind sustainable metals and alloys. *Chemical reviews*. 2023;123(5):2436-2608. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00799>.
7. Lavoie S., Dube G. A salt-free treatment of aluminium dross using plasma heating. *JOM*. 1991;54-55. <https://doi.org/10.1007/BF03220144>.

8. Makarov G.S. Global trends in secondary aluminum recycling and use. *Light alloy technology*. 2004;1:25-30. (In Russ.).
9. Meshram A., Singh K.K. Recovery of valuable products from hazardous aluminum dross: a review // *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 130. P. 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.026>.
10. Gaustad G., Olivetti E., Kirchain R. Improving aluminum recycling: a survey of sorting and impurity removal technologies // *Resources, Conservation and Recycling*. 2012. Vol. 58. P. 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.010>.
11. Domagala J., Haag P., Niehoff T., Schmitz C. *Handbook of aluminium recycling: mechanical preparation, metallurgical processing, heat treatment*. Essen: Vulkan-Verlag; 2014, 536 p.
12. Capuzzi S., Timelli G. Preparation and melting of scrap in aluminum recycling: a review. *Metals*. 2018;8(4):249. <https://doi.org/10.3390/met8040249>.
13. Trusov V.A. *Reverberatory furnace for aluminium scrap remelting*. Patent RF, no. 2529348; 2014. (In Russ.).
14. Rovin S.L., Kalinichenko A.S., Rovinc L.E. Recycling of dispersed metal wastes in rotary furnaces. *Journal of Casting & Materials Engineering*. 2019;3(2):43-49. <http://doi.org/10.7494/jcme.2019.3.2.43>.
15. Rovin S.L. Outlooks for application of rotary furnaces. Metal waste recycling. In: *Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya: sbornik trudov XXV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = Foundry Production and Metallurgy: Collected Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference*. 18–19 October, Minsk. Minsk: Belorusskij nacional'nyj tehnicheskij universitet; 2017, p. 65-71. (In Russ.).
16. Drouet M.G., Meunier J., Laflamme C.B., Handfield M.D., Biscaro A., Lemire C. A rotary arc furnace for aluminium dross processing. In: *Third International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials*. 12–15 November 1995, Alabama. Alabama: The Mineral, Metals and Materials Society; 1995, p. 803-812.
17. Kos B. Direct dross treatment by centrifuging of hot dross. *Aluminium*. 2000;76:35-36.
18. Wibner S., Antrekowitsch H., Meisel T.C. Studies on the formation and processing of aluminium dross with particular focus on special metals. *Metals*. 2021;11(7):1108. <https://doi.org/10.3390/met11071108>.
19. Wallace G. 4 - Production of secondary aluminium. *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*. 2011;70-82. <https://doi.org/10.1533/9780857090256.1.70>.
20. Raabe D., Ponge D., Uggowitzer P.J., Roscher M., Paolantonio M., Liu Chuanlai, et al. Making sustainable aluminum by recycling scrap: the science of “dirty” alloys. *Progress in Materials Science*. 2022;128:100947. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100947>.
21. Drouet M.G., Leroy R.L., Tsantrizos P.G. Drossite salt-free processing of hot aluminium dross. In: *TMS Fall Extraction and Process, Metallurgy Meeting*. 22–25 October 2000, Pittsburgh, Pennsylvania. Pittsburgh, Pennsylvania: The Minerals, Metals and Materials Society; 2000, p. 1135-1145.
22. Kolbeinsen L. The beginning and the end of the aluminium value chain. *Matériaux & Techniques*. 2020;108(5-6):506. <https://doi.org/10.1051/mattech/2021008>.
23. Novichkov S.B. Regularities of aluminum slag smelting in a rotary tilting furnace. *Tsvetnye metally*. 2004;1:67-70. (In Russ.).
24. Ibragimov V.E., Garcia M.L., Bazhin V.Y. Melting of thin walled paint scrap coatings for aluminum alloy production. *International Research Journal*. 2016;2:14-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.44.068>.
25. Shinzato M.C., Hypolito R. Solid waste from aluminum recycling process: characterization and reuse of its economically valuable constituents. *Waste management*. 2005;25(1):37-46. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.08.005>.
26. Wong David S., Lavoie P. Aluminum: recycling and environmental footprint. *JOM*. 2019;71(9):2926-2927. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03656-9>.
27. Zholnin A.G., Novichkov S.B. Mechanism of aluminum transition from slag to melt during smelting of aluminum waste in rotary furnaces. *Nonferrous metallurgy*. 2003;1:22-27. (In Russ.).
28. Nemchinova N.V., Belskii S.S., Vlasov A.A. Studying aluminum alloy defects. *Solid State Phenomena*. 2021;316:353-358. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.353>.
29. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A. Metallographic investigation of aluminum rondol samples. *Fundamental research*. 2015;3:124-128. (In Russ.). EDN: TNIQRV.
30. Fomin B.A., Moskvitin V.I., Mahov S.V. *Metallurgy of secondary aluminum*. Moscow: EKOMET; 2004, 238 p. (In Russ.). EDN: QMZMIB.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Фернандес Пенья Александр**,  
аспирант,  
Санкт-Петербургский горный университет  
императрицы Екатерины II,  
199106, г. Санкт-Петербург,  
Васильевский остров, 21 линия, 2, Россия  
s243022@stud.spmi.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Alejandro Fernandes Penya**,  
Postgraduate Student,  
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining  
University,  
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia  
s243022@stud.spmi.ru

**Бажин Владимир Юрьевич,**

д.т.н., профессор,  
заведующий кафедрой металлургии,  
Санкт-Петербургский горный университет  
императрицы Екатерины II,  
199106, г. Санкт-Петербург,  
Васильевский остров, 21 линия, 2, Россия  
✉ bazhin-alfoil@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

**Vladimir Yu. Bazhin,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Metallurgy Department,  
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining  
University,  
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia  
✉ bazhin-alfoil@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

**Макушин Дмитрий Владимирович,**

к.т.н.,  
доцент кафедры металлургии,  
Санкт-Петербургский горный университет  
императрицы Екатерины II,  
199106, г. Санкт-Петербург,  
Васильевский остров, 21 линия, 2, Россия  
dimanych99@mail.ru

**Dmitry V. Makushin,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Metallurgy Department,  
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining  
University,  
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia  
dimanych99@mail.ru

**Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Authors' contribution**

The authors contributed equally to the article.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

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

**Информация о статье**

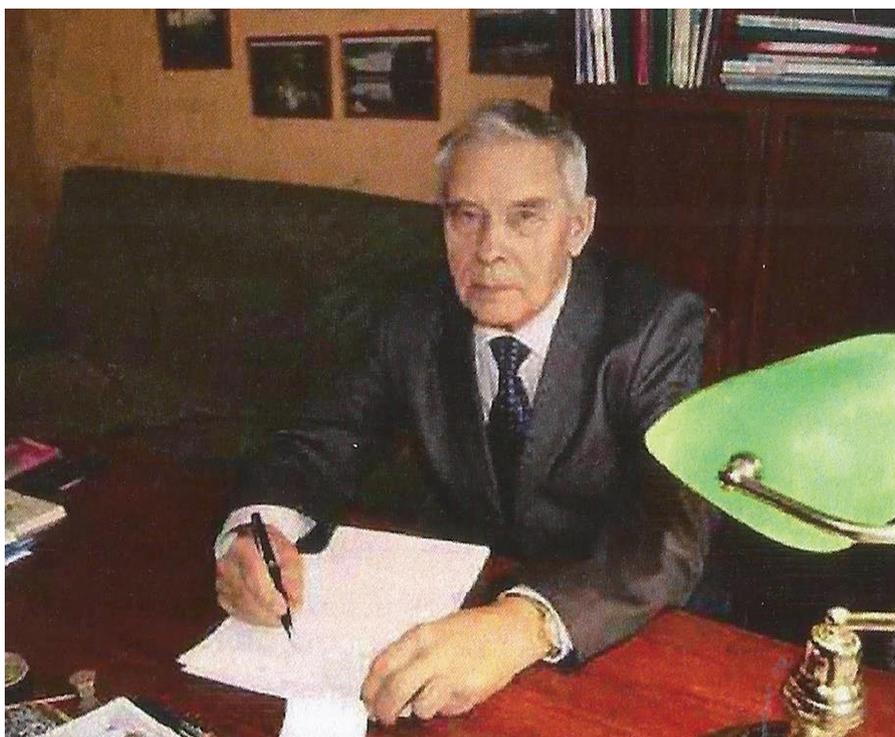
Статья поступила в редакцию 31.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 20.11.2024 г.; принята к публикации 09.12.2024 г.

**Information about the article**

The article was submitted 31.10.2024; approved after reviewing 20.11.2024; accepted for publication 09.12.2024.

## ПЕРСОНАЛИЯ

### Альберту Ивановичу Бегуну – 90!



30 октября 2024 года Альберт Иванович Бегун, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, профессор-консультант кафедры химии и биотехнологии им. В.В. Тутуриной Иркутского национального исследовательского технического университета, отметил свое 90-летие.

По образованию А.И. Бегун – ленинградский политехник, с 1952 по 1958 год учился на физико-металлургическом и электромеханическом факультетах Ленинградского политехнического института.

По окончании вуза работал электролизником и мастером в г. Краснотурьинск на Богословском алюминиевом заводе, далее – мастером и старшим мастером экспериментальных цехов.

В 1965 г. защитил кандидатскую диссертацию на выездном заседании объединенного Совета Иркутского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук на Иркутском алюминиевом заводе.

Через три года А.И. Бегун был приглашен на работу в Иркутский политехнический институт на должность заведующего кафедрой аналитической и физической химии. Более 50 лет читал студентам – будущим химикам и металлургам – физическую химию.

Долгие годы Альберт Иванович был заместителем председателя Диссертационного совета ИРНИТУ, научным руководителем кандидатских и докторских диссертаций, подготовил 5 докторов и 25 кандидатов наук.

Альберт Иванович – автор 13 монографий по проблемам электрометаллургии. В этой же области получил 130 патентов на изобретения. Изобретение № 163756 и другие разработки совместно с соавторами успешно использованы при обжиге и пуске электролизных ванн новых 56 корпусов Иркутского, Братского и Красноярского алюминиевых заводов – долгое время бывших крупнейшими заводами мира, а также заводов с электролизерами такого типа в Турции, Индии и Северной Корее, построенных по проектам СССР. Среди патентов, автором и соавтором которых является Альберт Иванович, известно изобретение, посвященное альтернативному способу получения алюминия – на галлиевом катоде.

В последние годы А.И. Бегунов с соавторами получил ряд патентов на изобретения Российской Федерации по новым методам

получения кремния, титана, способам и условиям превращения оксидов основных металлов в легкоплавкие хлориды. Эти методы и устройства обещают в перспективе оснастить металлургию низкотемпературными, герметичными и экологически чистыми видами производств.

*Редакция журнала «iPolytech Journal» и ректорат Иркутского национального исследовательского технического университета поздравляют Альберта Ивановича Бегунова, заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, профессора ИРНТУ, академика Международной академии наук высшей школы и МАН Экологии природопользования со славным Юбилеем! От души желаем Альберту Ивановичу крепкого здоровья, неиссякаемой энергии и дальнейшего внедрения его научных разработок!*

## БЛАГОДАРНОСТИ

*В преддверии Нового Года редколлегия журнала iPolytech journal выражает огромную благодарность ученым, которые нашли время для экспертной оценки и помогли нашему журналу произвести отбор лучших работ для публикации.*

*Уважаемые коллеги! Спасибо за ваше участие и полезные замечания! Ваша работа помогает журналу развиваться и далее повышать научный уровень публикуемых работ! Мы очень ценим вашу поддержку и надеемся на дальнейшее плодотворное сотрудничество! Выражаем искреннюю признательность рецензентам статей 2024 года:*

- **АКСЕНОВУ АЛЕКСАНДРУ ВЛАДИМИРОВИЧУ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **АРСЕНТЬЕВУ ОЛЕГУ ВАСИЛЬЕВИЧУ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **БЕЛОУСОВОЙ НАТАЛЬЕ ВИКТОРОВНЕ**, д.т.н., Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия;
- **БЕЛЬСКОМУ СЕРГЕЮ СЕРГЕЕВИЧУ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **БЛЮМЕНШТЕЙНУ ВАЛЕРИЮ ЮРЬЕВИЧУ**, д.т.н., Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Кемерово, Россия;
- **БОЧКАРЕВУ ВИКТОРУ АЛЕКСАНДРОВИЧУ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **БУЛАТОВУ ЮРИЮ НИКОЛАЕВИЧУ**, к.т.н., Братский государственный университет, Братск, Россия;
- **ВАСИЛЬЕВУ АНДРЕЮ АНАТОЛЬЕВИЧУ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **ВОЙТОВУ ОЛЕГУ НИКОЛАЕВИЧУ**, к.т.н., Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия;
- **ДИМОВУ ЮРИЮ ВЛАДИМИРОВИЧУ**, д.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **ДУНАЕВУ МИХАИЛУ ПАВЛОВИЧУ**, д.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **ДРЕГЛЯ АЛЕНЕ ИВАНОВНЕ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **ЗАЙДЕСУ СЕМЕНУ АЗИКОВИЧУ**, д.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **ЕЛИСЕЕВУ АНДРЕЮ ВЛАДИМИРОВИЧУ**, к.т.н., Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия;
- **ИВАНОВУ СЕРГЕЮ ДМИТРИЕВИЧУ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **ИСАЧЕНКО АЛЕКСЕЮ СЕРГЕЕВИЧУ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **КАРАМОВУ ДМИТРИЮ НИКОЛАЕВИЧУ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **КАРГАПОЛЬЦЕВУ СЕРГЕЮ КОНСТАНТИНОВИЧУ**, д.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **КУЗНЕЦОВУ НИКОЛАЮ КОНСТАНТИНОВИЧУ**, д.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **КУЗЬМИНОЙ МАРИНЕ ЮРЬЕВНЕ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;

- **КУДРЯШОВУ АЛЕКСАНДРУ НИКОЛАЕВИЧУ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **МАЙОРОВУ ГЛЕБУ СЕРГЕЕВИЧУ**, к.т.н., Институт систем энергетики им. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия;
- **МИНЕЕВОЙ ТАТЬЯНЕ СУЛТАНОВНЕ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **НЕМЧИНОВОЙ НИНЕ ВЛАДИМИРОВНЕ**, д.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **НИЖЕГОРОДОВУ АНАТОЛИЮ ИВАНОВИЧУ**, д.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **НИКАНОРОВУ АЛЕКСАНДРУ ВИТАЛЬЕВИЧУ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **НИКОЛАЕВОЙ ЕЛЕНЕ ПАВЛОВНЕ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **ОДНОКУРЦЕВУ КОНСТАНТИНУ АНДРЕЕВИЧУ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **РАСПОПИНОЙ ВЕРЕ БОРИСОВНЕ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **РУБАЛУ НИКОЛАЮ ЮРЬЕВИЧУ**, к.т.н., Томский политехнический университет, Томск, Россия;
- **САМАДУ НОЭЯГДАМУ**, PhD, Академия наук провинции Хэнань, Чжэнчжоу, Китай;
- **СВИНИНУ ВАЛЕРИЮ МИХАЙЛОВИЧУ**, д.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **СЕРДЮКОВОЙ ЕКАТЕРИНЕ ВЛАДИМИРОВНЕ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **СОЛЕРУ ЯКОВУ ИОСИФОВИЧУ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **СТАШКЕВИЧ ЕЛЕНЕ ВЛАДИМИРОВНЕ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **СУСЛОВУ КОНСТАНТИНУ ВИТАЛЬЕВИЧУ**, д.т.н., Московский энергетический университет, Москва, Россия;
- **СЯНДУН ЛЮ**, PhD, Пекинский технологический институт, Китай;
- **ТИГУНЦЕВУ СТЕПАНУ ГЕОРГИЕВИЧУ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **ТОМИНУ НИКИТЕ ВИКТОРОВИЧУ**, к.т.н., Институт систем энергетики им. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия;
- **ТЮТРИНУ АНДРЕЮ АЛЕКСАНДРОВИЧУ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **ФАНГ ЛЮ**, PhD, Центральный Южный университет, Чанша, Китай;
- **ФЕДОСОВУ ДЕНИСУ СЕРГЕЕВИЧУ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **ФЕДОТОВУ АЛЕКСАНДРУ ИВАНОВИЧУ**, д.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **ФЕДЧИШИНУ ВАДИМУ ВАЛЕНТИНОВИЧУ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **ЧЕБОТНЯГИНУ ЛЕОНИДУ МИХАЙЛОВИЧУ**, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия;
- **ЮАНЬ ЦЗЭН**, PhD, Тяньцзиньский университет, Китай;
- **ЯКОВЛЕВОЙ АРИАДНЕ АЛЕКСЕЕВНЕ**, д.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.

## 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. Рукопись статьи направляется в редакцию через online форму (после предварительной регистрации авторов). Рекомендуемый объем статьи не менее 20 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение от аффилированной организации о возможности публикаций в открытой печати.
2. Лицензионный договор.

3. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (5–7); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон, e-mail и ORCID (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](mailto: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 яркими 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 «iPolytech Journal» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть науки (Категория K1) в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНИТИ РАН.

**Статьи, опубликованные в журнале «iPolytech Journal», реферируются и рецензируются.**

**Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.**

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. ский 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](mailto:pgp@istu.edu).

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 Ю.В. Макаровой

Выход в свет 27.12.2024 г.  
Формат 60x90/8.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 26,5.  
Тираж 500 экз. Номер по реестру 87/Зн.

Издание распространяется бесплатно



**iPolytech Journal**

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