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

iPolytech Journal

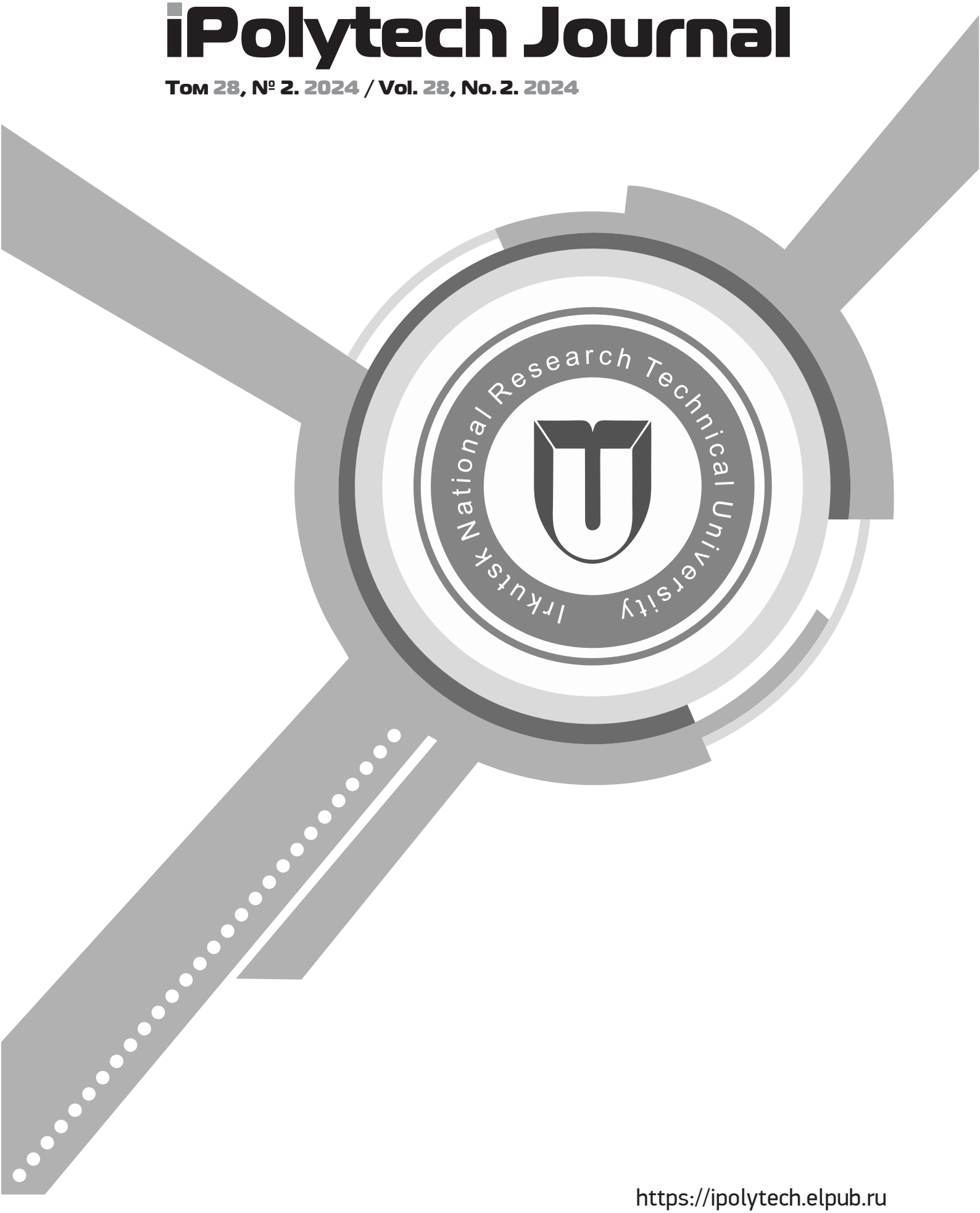
Том 28, № 2. 2024 / Vol. 28, No 2. 2024

https://ipolytech.ru

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

iPolytech Journal

Том 28, № 2. 2024 / Vol. 28, No. 2. 2024



https://ipolytech.elpub.ru

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

iPolytech Journal

Том 28, № 2. 2024 / Vol. 28, No. 2. 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 - **4 раза в год. Языки – русский и английский.**

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор): Регистрационный номер: **ПИ № ФС 77–82388 от 10 декабря 2021 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 2011г.;
ПИ № ФС77-62813 от 18 августа 2015 г.).

Учредитель и издатель:

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

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

iPolytech Journal

Том 28, № 2. 2024 / Vol. 28, No. 2. 2024

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 tehnicheskogo universiteta). 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 Feteration

Publishers:

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

Editorial office:

83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Feteration
e-mail: pgp@istu.edu

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

iPolytech Journal

Том 28, № 2. 2024 / Vol. 28, No. 2. 2024

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, Университетскийколледж 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 Тунцзи (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, прфессор Цзянсуского 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 Бертхольт, директор Института металловедения Кассельского университета (Кассель, Германия)

iPolytech Journal

Том 28, № 2. 2024 / Vol. 28, No. 2. 2024

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,Dehuty 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. KORNIAKOV, 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 Caterine 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. BOROVIKOV, 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)
Vasiliy 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, Jiangsce University (Zheniang, 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 Enngineering 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)
Berholt SCHOLTES, Director, Institute of Metal Science, University of Kassel (Kassel, Germany)

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

iPolytech Journal

Том 28, № 2. 2024 / Vol. 28, No. 2. 2024

Содержание

Машиностроение

Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Стародубцева Д.А. Моделирование процесса формирования остаточных напряжений при выполнении технологической последовательности «дробеударная обработка – зачистка лепестковым кругом» 202
Лобанов Д.В., Рафанова О.С. Анализ и выбор композиционного материала для изготовления изделий на этапе конструкторской подготовки производства 214
Свинин В.М., Шутенков А.В., Пономарев Б.Б. Определение основных технических параметров проектируемой сверлильной машины с автоматической подачей 224
Филиппенко Н.Г., Каргапольцев С.К., Чумбадзе И.Т. Некоторые аспекты контроля процесса фотополимеризации в аддитивных технологиях 238

Энергетика

Войтов О.Н., Голуб И.И., Семенова Л.В., Карпова Е.В., Бучинский А.Л. Исследование влияния несбалансированности нагрузок сети низкого напряжения на потокораспределение в сети среднего напряжения 247
Воронин В.А., Непша Ф.С. Управление напряжением в низковольтных распределительных сетях в условиях внедрения домашних зарядных станций электромобилей 261
Добрынина Ю.Э., Крупенёв Д.С. Анализ учёта критериев системной надёжности в моделях выбора состава включенного генерирующего оборудования в электроэнергетических системах 273
Донской И.Г. Задача Стефана в тепловыделяющем цилиндрическом образце с граничными условиями третьего рода: расчёт времени расплавления 290
Дулов И.В., Фишов А.Г. Прототип автоматики контроля успешности пуска асинхронных двигателей в локальных системах энергоснабжения 303
Крюков А.В., Черепанов А.В., Нгуен Куок Хиеу. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения с нелинейными стационарными нагрузками 320
Попова Е.В., Томин Н.В. Анализ подходов к объединению микросетей в энергетические сообщества 330
Терзия В., Динг Лэй. Умные технологии и решения для будущих устойчивых и надежных энергетических систем 346

Металлургия

Головашов И.А., Алексеев Д.И., Швалева А.В. Электрообезвоживание каменноугольной смолы – побочного продукта при получении кокса для доменной плавки 360
Ильин А.А., Пикалова И.А., Зобнин Н.Н. Исследование распределения бора между кремнием и шлаками систем $CaO\text{-}SiO_2$, $MgO\text{-}SiO_2$, $CaO\text{-}MgO\text{-}SiO_2$, $CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2$ в восстановительных условиях 371
Мамяченков С.В., Блудова Д.И., Ханжин Н.А. Влияние параметров обжига на удаление мышьяка из пыли медеплавильного производства 386

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

iPolytech Journal

Том 28, № 2. 2024 / Vol. 28, No. 2. 2024

Content

Mechanical engineering

Le Tri Vinh, Koltsov V.P., Starodubtseva D.A. Simulating residual stresses formed in the technological sequence of shot-impact treatment–flap-wheel trimming 202
Lobanov D.V., Rafanova O.S. Analysis and selection of composite material for the manufacture of products during the design preparation stage 214
Svinin V.M., Shutenkov A.V., Пономарев В.В. Main technical parameters for designing a new self-feed drilling machine 224
Filippenko N.G., Kargapoltsev S.K., Chumbadze T.T. A few aspects of controlling the photopolymerisation process in additive manufacturing 238

Power engineering

Voitov O.N., Golub I.I., Semenova L.V., Karpova E.V., Buchinsky A.L. Effects of unbalanced loads in a low-voltage network on flow distribution in a medium-voltage network 247
Voronin V.A., Nepsha F.S. Voltage control in low-voltage distribution networks in the context of introducing home charging stations for electric vehicles 261
Dobrynina Y.E., Krupenev D.S. Consideration of system security criteria in the models of power system unit commitment 273
Donskoy I.G. Stefan problem for a heat-generating cylindrical sample with boundary conditions of the third kind: calculation of melting time 290
Dulov I.V., Fishov A.G. Prototype of an automatic system for monitoring the success of starting asynchronous motors in local power supply systems 303
Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Nguyen Quoc Hieu. Modelling of traction power supply systems with nonlinear stationary loads 320
Popova E.V., Tomin N.V. Analysis of approaches to integrating microgrids into energy communities 330
Terzija V., Ding Lei. Smart technologies and solutions for future sustainable and resilient energy systems 346

Metallurgy

Golovashov I.A., Alekseev D.I., Shvaleva A.V. Electric dehydration of coal tar – a by-product of coke production for blast furnace smelting 360
Ilin A.A., Pikalova I.A., Zobnin N.N. Study of boron distribution between silicon and slags of $CaO\text{-}SiO_2$, $MgO\text{-}SiO_2$, $CaO\text{-}MgO\text{-}SiO_2$, and $CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2$ systems under reducing conditions 371
Mamyachenkov S.V., Bludova D.I., Khanzhin N.A. Effect of roasting parameters on arsenic removal from copper smelting dust 386

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

iPolytech Journal

Том 28, № 2. 2024 / Vol. 28, No. 2. 2024

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 Journales (DOAJ), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНИТИ РАН, каждой статье присваивается цифровой индификатор **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

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

iPolytech Journal

Том 28, № 2. 2024 / Vol. 28, No. 2. 2024

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

iPolytech Journal 2024. Т. 28. № 2. С. 202-213 ISSN 2782-4004 (print)
2024;28(2):202-213 ISSN 2782-6341 (online)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья
УДК 669.715
EDN: QAHLRO
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-202-213

Моделирование процесса формирования остаточных напряжений при выполнении технологической последовательности «дробеударная обработка – зачистка лепестковым кругом»

Чи Винь Ле[1], В.П. Кольцов[2], Д.А. Стародубцева[3]✉

[1-3]*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*

Резюме. Цель – исследование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя детали из алюминиевого сплава ВТ95 при дробеударной обработке и последовательности операций «дробеударная обработка – зачистка лепестковым кругом». Объектами исследования являются крупногабаритные детали типа панелей и обшивок сложной формы, применяемые в самолето-, ракето- и судостроении. При разработке методики определения остаточных напряжений использовалось компьютерное моделирование в программном комплексе Ansys Workbench 19.0. В результате моделирования изучаемых процессов обработки получено наглядное представление характера формирования остаточных напряжений, физические значения и графики распределения последних. Установлено, что характер распределения остаточных напряжений после выполнения двух видов обработки схож. Максимальное значение остаточных напряжений, полученных в результате выполнения дробеударной обработки поверхности детали дробью диаметром 3,0 мм при скорости удара дроби 25 м/с, достигает порядка 600 МПа при глубине залегания 1,0 мм. После дробеударной обработки выполняется зачистка лепестковым кругом, в конечно-элементном моделировании, представленном в виде набора абразивных зерен со скоростью 18,316 м/с. Показано, что удаление в процессе зачистки с поверхности пластины слоя 25, 50 и 75 мкм способствует срезанию верхней части эпюры остаточных напряжений и, как следствие, к уменьшению значений остаточных напряжений в технологической последовательности «дробеударная обработка – зачистка» до 400 МПа. Также установлено, что по мере увеличения толщины снятого с поверхности детали слоя при зачистке величина остаточных напряжений сокращается медленнее. При этом независимо от толщины снимаемого слоя при зачистке, глубина залегания сжимающих остаточных напряжений практически не изменена (около 0,7 мм). Разработанная конечно-элементная модель позволяет прогнозировать и контролировать уровень и величину остаточных напряжений в образце из алюминиевого сплава еще на стадии технологической подготовки для операций «дробеударная обработка», а также сочетание операций «дробеударная обработка – зачистка».

Ключевые слова: обработка дробью, дробеударная обработка, зачистка лепестковым кругом, отпечатки дроби, остаточные напряжения

Для цитирования: Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Стародубцева Д.А. Моделирование процесса формирования остаточных напряжений при выполнении технологической последовательности «дробеударная обработка – зачистка лепестковым кругом» // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 202–213. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-202-213. EDN: QAHLRO.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Simulating residual stresses formed in the technological sequence of shot-impact treatment–flap-wheel trimming

Tri Vinh Le[1], Vladimir P. Koltsov[2], Daria A. Starodubtseva[3]✉

[1-3]*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

Abstract. The paper aims to study the stress-strain state of the surface layer in a VT95 aluminum alloy part during its shot-impact treatment in the sequence of “shot-impact treatment–flap-wheel trimming” operations. The research objects included large parts, such as panels and cladding of complex shapes used in aircraft, missile, and

© Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., 2024

shipbuilding industries. Computer simulation in the Ansys Workbench 19.0 software package was used to develop a methodology for determining residual stresses. As a result of simulating the studied treatment sequence, a visual representation of the residual stress formation pattern, as well as physical values and distribution curves of residual stresses, were obtained. The distribution pattern of residual stresses after performing two types of treatment was established to be similar. The maximum value of residual stresses, obtained as a result of performing a shot-impact treatment of the part surface with a shot of 3.0 mm in diameter at a shot-impact rate of 25 m/s, reaches about 600 MPa at a depth of 1.0 mm. Following the shot-impact treatment, flap-wheel trimming is performed in the finite element simulation as a set of abrasive grains at a rate of 18.316 m/s. The removal of the 25-, 50-, and 75-μm layer from the surface of the plate during trimming contributes to the shearing of the upper part in the residual stress diagram and, as a result, to a decrease in the values of residual stresses in the shot-impact treatment–flap-wheel trimming sequence to 400 MPa. In addition, along with an increase in the thickness of the layer removed from the surface during trimming, the value of residual stresses decreases more slowly. In this case, the thickness of the removed layer causes no effect on the depth of residual compression stresses (about 0.7 mm). The developed finite element model makes it possible to predict and control the level and magnitude of residual stresses in an aluminum alloy sample at the stage of its preparation for both a shot-impact treatment operation and the combination of shot-impact treatment and flap-wheel trimming.

Keywords: shot processing, shot peening, grinding with a flap wheel, shot indents, residual stresses
For citation: Le Tri Vinh, Koltsov V.P., Starodubtseva D.A. Simulating residual stresses formed in the technological sequence of shot-impact treatment–flap-wheel trimming. *iPolytech Journal.* 2024;28(2):202-213. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-202-213. EDN: QAHLRO.

ВВЕДЕНИЕ

Для изготовления криволинейных панелей и обшивок крыла самолета уже многие годы успешно применяется комплексная технология дробеударной обработки с последующей зачисткой лепестковым кругом. Вследствие ударного воздействия дроби на поверхности обрабатываемой детали образуется множество отпечатков дроби, расположенных в хаотичном порядке с различными диаметрами и глубиной [1–4]. На рис. 1 представлено типичное изображение сканированного участка поверхности экспериментального образца, изготовленного из алюминиевого сплава В95 после дробеударной обработки на фактическом режиме производственного процесса дробеударного формообразования обшивок крыла самолета. На рис. 1 хорошо видны следы в виде борозд, образованных в результате фрезерования поверхности до обработки дробью, и отпечатки дроби в виде окружностей различного размера, полученные в результате воздействия дроби. При этом установлено, что самый большой отпечаток дроби на исследуемом участке поверхности имеет глубину до 40 мкм.

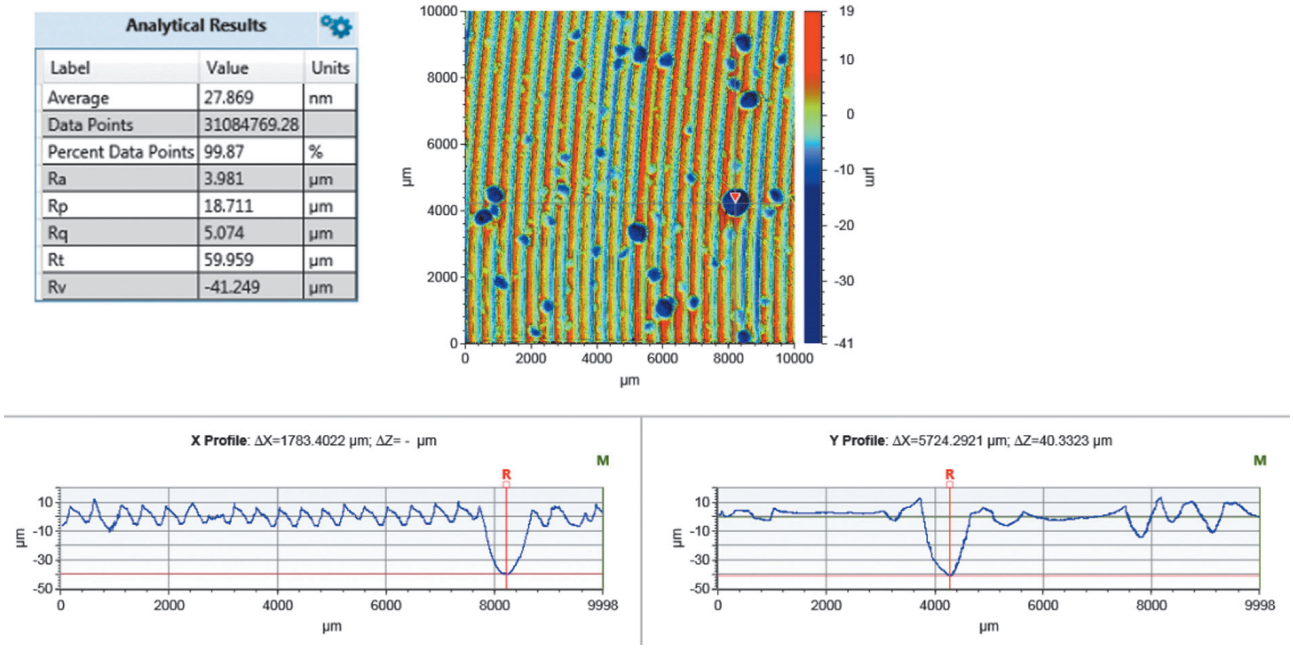


Рис. 1. *Изображение сканированного участка поверхности образца после дробеударной обработки*
Fig. 1. *An image of the scanned area of the shot peened sample surface*

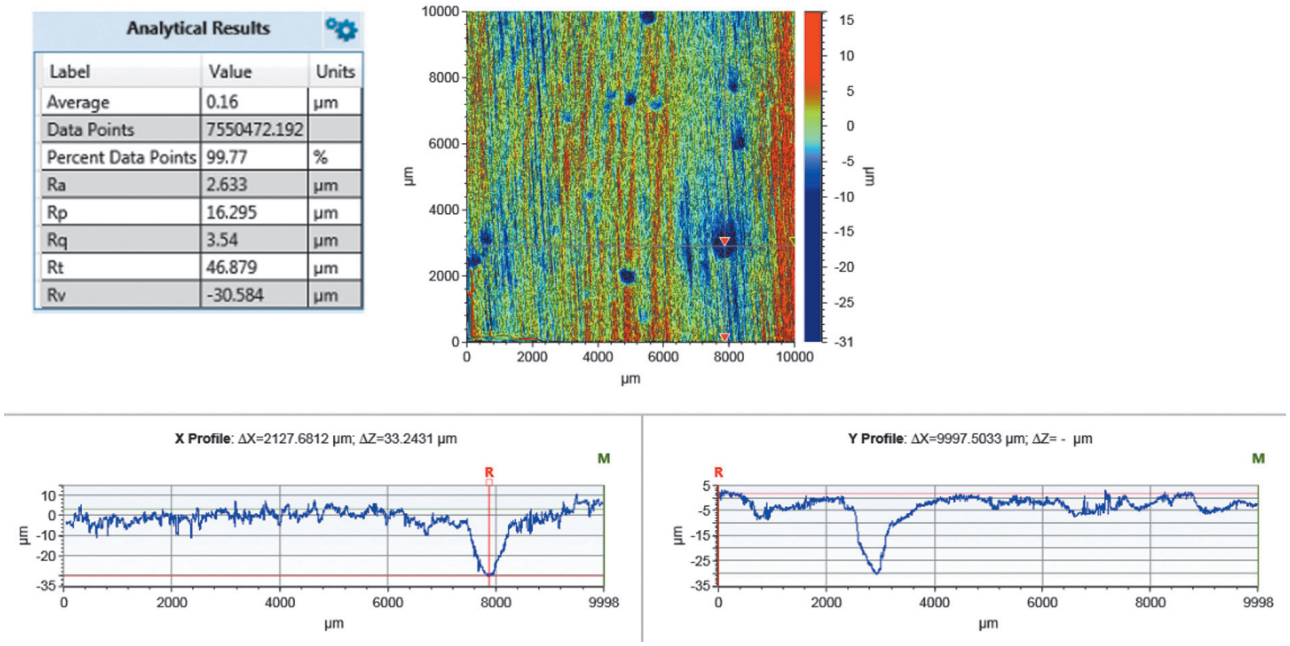


Рис. 2. *Изображение сканированного участка поверхности образца, обработанного дробью с последующей зачисткой лепестковым кругом*
Fig. 2*. An image of the scanned area of the shot peened sample surface subsequently grinded with a flap wheel*

На рис. 2 представлено типичное изображение сканированного участка поверхности этого же образца после дробеударной обработки и последующей зачистки лепестковым кругом. Несмотря на значительное снижение шероховатости от Ra 3,981 до Ra 2,633 (рис. 1, 2), достигнутой при снятии слоя 10 мкм в результате зачистки, глубина самого крупного отпечатка на исследуемом участке поверхности – 30,584 мкм (исходная глубина до зачистки 41,249 мкм).

Наличие отпечатков дроби с различными глубинами и диаметрами на поверхности после дробеударной обработки объясняется различной скоростью удара и углами атаки дроби об обрабатываемую поверхность, а также случаями соударения дроби падающего и встречного потока в результате ее отскока и т.д.

При дробеударной обработке в верхнем слое поверхности детали происходит пластическая деформация материала, в результате в поверхностном слое детали под отпечатками дроби возникают остаточные напряжения, которые создают изгибающие моменты, способствующие приданию панелям и обшивкам требуемой формы. После удаления некоторого поверхностного слоя зачисткой лепестковым кругом напряженно-деформированное состояние данного слоя изменяется, что приведет к возможному изменению формы дробеобработанной поверхности детали [5–10].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использование классических методов определения остаточных напряжений при дробеударной обработке (внедрении индентора) требует применения достаточно сложного математического аппарата и не менее трудоемких экспериментов. Поэтому получение достоверных, надежных и обобщенных методик о влиянии остаточных напряжений в упрочненных деталях с концентраторами напряжений является весьма актуальной научной задачей.

Отечественные и зарубежные публикации по теме исследования показали, что проблеме определения остаточных напряжений в упрочненных деталях с концентраторами напряжений уделяется недостаточно внимания, что связано со сложностью данной проблематики и трудностями как теоретического, так и экспериментального характера [11–22].

Целью работы является разработка методики определения остаточных напряжений в поверхностном слое детали, вызванных ударами дроби и последующей зачисткой лепестковым кругом, что имеет весьма актуальное и важное значение при изготовлении панелей и обшивок крыла самолета.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для моделирования процесса дробеударной обработки и последующей зачистки лепестковым кругом применялась компьютерная программа для инженерного анализа Ansys Workbench 19.0, в которой расчет выполняется методом конечных элементов. Конечно-элементная модель дробеударной обработки и зачистки лепестковым кругом, а также расчеты и анализ остаточных напряжений проведены в модуле Explicit Dynamics (явная динамика).

На практике при изготовлении панелей и обшивок дробеударное формообразование выполняется с невысокой степенью покрытия поверхности отпечатками дроби (соотношение площади отпечатков дроби исследуемого участка поверхности к общей площади исследуемого поверхности детали) до 30%. Вследствие последнего достаточно редко можно встретить случай перекрытия отпечатков дроби на поверхности детали (см. рис. 1). Поэтому частным случаем изучения характера формирования остаточных напряжений процесса дробеударного формообразования может быть изучение характера единичного удара дроби о поверхность, и как следствие единичный отпечаток дроби.

На рис. 3 представлена конечно-элементная модель процесса дробеударной обработки поверхности с последующей зачисткой лепестковым кругом [23]. В качестве обрабатываемой детали построена пластина с габаритными размерами 1,5×2×3 мм, материал пластины выбран из библиотеки каталога материалов программы Ansys Workbench 19.0 – AL7075-T6 (аналог алюминиевого сплава ВТ95, применяемого для изготовления панелей и обшивок). В качестве дроби смоделирована сфера диаметром 3 мм (шарик), представляющая собой абсолютно жесткое и гладкое тело. Размер сферы выбран исходя из используемой на производстве дроби при формообразовании панелей и обшивок крыла самолета. В качестве абразивного инструмента (лепесткового круга) смоделированы 8 зерен абразива в форме равносторонней треугольной призмы. Размер каждой из сторон призмы – 270 мкм, что соответствует среднему размеру зерна абразива из электрокорунда зернистостью Р25 (размер зерна для данной зернистости лежит в пределах от 250 до 315 мкм)[4].

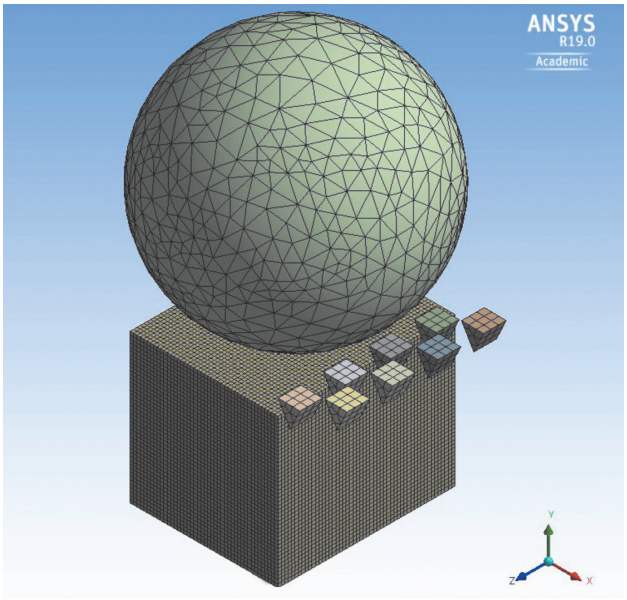


Рис. 3. *Конечно-элементная модель процесса дробеударной обработки с последующей зачисткой лепестковым кругом*
Fig. 3. *Finite element model of the shot peening process with subsequent grinding with a flap wheel*

Форма абразивного зерна задана в виде равносторонних треугольных призм исходя из следующих соображений. В процессе зачистки лепестковым кругом, при достаточно высокой частоте вращения, лепесток изгибается, и контакт каждого зерна с поверхностью детали происходит по направлению движения лепесткового круга на достаточно малом участке, оставляя после движения непротяженной длины риску. Как установлено из предварительно выполненного моделирования, глубина рисок, форма полученной риски и величины остаточных напряжений при внедрении абразивных зерен различной формы несущественно отличаются. Однако использование в качестве модели абразивного зерна зерно принятой формы (в виде равносторонних треугольных призм) показало наилучший результат расчета программы и анализа (без уведомления об ошибках) и значительно меньшее время расчета.

Несмотря на хаотическое расположение абразивных зерен на лепестке круга, при контакте лепестка с поверхностью детали он изгибается, и пространство между абразивными зернами, например, первого ряда лепестка, перекрывают другие зерна последующих рядов или последующих лепестков.

[4]Димов Ю.В. Обработка эластичным инструментом и свободным абразивом: учеб. пособ. Иркутск: ИРНИТУ, 2017. 202 с.

Поэтому для упрощения модели принято решение создать два ряда зерен абразива, принятых за одну партию абразива, так, чтобы зерна второго ряда горизонтально перекрывали пространство между зернами первого ряда (см. рис. 2). Кроме того, зерна расположены на равной глубине 25 мкм (в качестве припуска на зачистку) при угле наклона 60° к поверхности пластины.

Конечно-элементная модель пластины лишена всех степеней свободы в нижней плоскости, что не позволяет ей перемещаться. Остальные 4 боковые стороны пластины лишены перемещения по нормальному направлению для обеспечения симметрии деформации при исследовании модели.

В качестве нагрузки, вызванной ударом дроби в процессе дробеударной обработки, выбрана начальная скорость удара дроби 25 м/с (в соответствии с окружной скоростью дроби при вылете из дробеметного колеса дробеударной установки УДФ-4), которая приложена к шарику по направлению, нормальному к поверхности пластины.

Абразивные зерна лишены перемещения по направлениям осей OZ и OY, перемещение происходит только по направлению оси OX с постоянной скоростью 18,316 м/с, что соответствует окружной скорости лепесткового круга диаметром 350 мм при частоте вращения привода круга 1000 об/мин.

Исследование проведено для 4-х различных случаев. В первом случае – удар шарика по пластине без воздействия абразивных зерен, последующие 3 случая соответствуют удару шарика и движению первой, второй и третий партий абразивных зерен по очереди с глубиной внедрения в пластину 25, 50 и 75 мкм соответственно. При этом модель построена таким образом, что после каждого удара дроби о поверхность и удаления с поверхности пластины слоя материала было достаточное количество времени для восстановления в пластине упругой деформации.

Генерация сетки конечных элементов выполнена автоматически в программе Ansys. Для успешного снятия конкретной величины слоя материала с поверхности пластины при зачистке размер элементов выбран кратным величине толщины снимаемого слоя (в исследуемом случае 25 мкм).

На рис. 4 представлен результат напря-

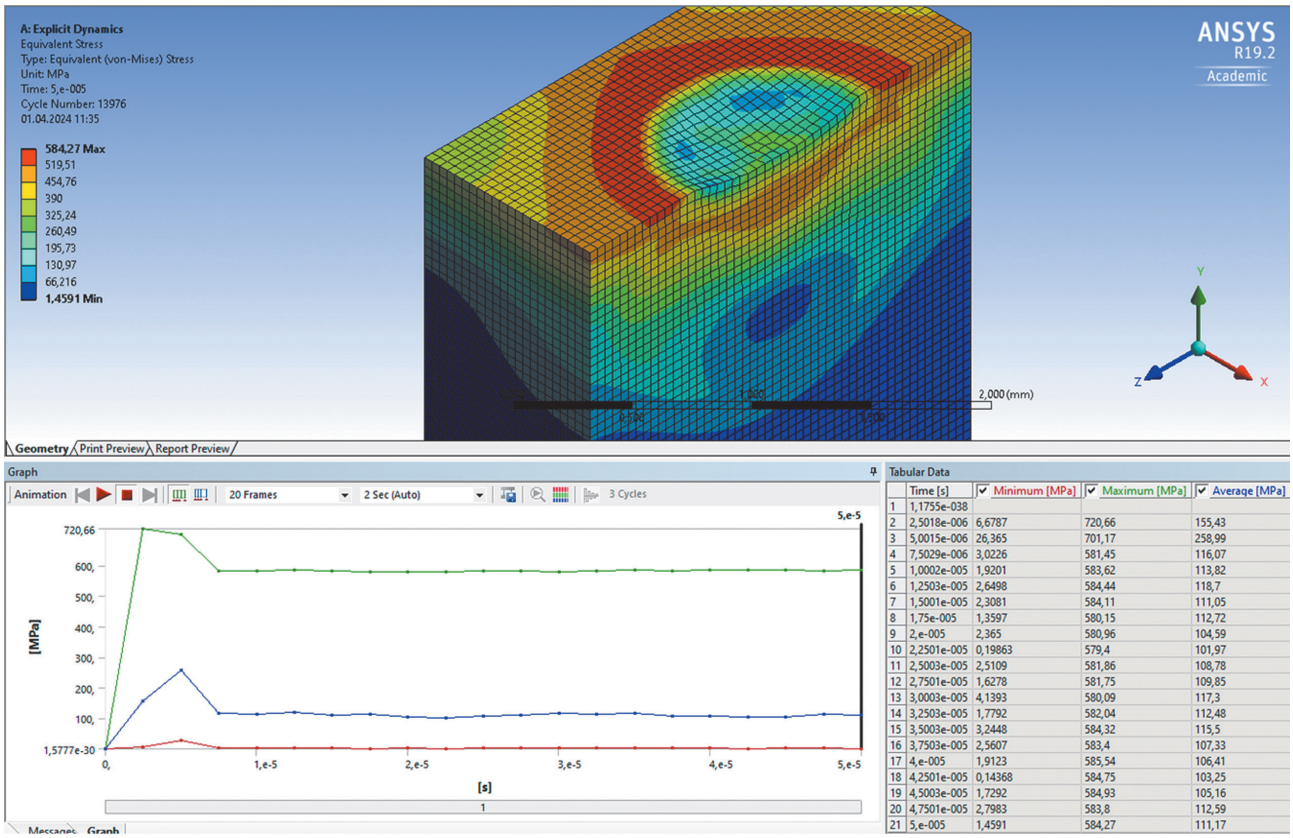


Рис. 4. *Напряженно-деформированное состояние пластины после удара шарика*
Fig. 4. *Stress-strain state of the plate after the ball impact*

женно-деформированного состояния пластины в сечении, проходящем через центр шарика после удара, полученный в программе инженерного анализа Ansys. Глубина отпечатка шарика после удара составила 75 мкм.

На рис. 5 представлено напряженно-деформированное состояние пластины после удара шарика и последующей зачистки абразивным зерном со снятием 3-х слоев материала с поверхности пластины по 25 мкм каждого в том же поперечном сечении, как на рис. 4.

Проанализировав данные рис. 4 и 5, следует, что распределение напряжений и деформаций пластины, а также их значения в первом случае, в зоне отпечатка после удара шарика, и во втором – после удара шарика с последующим снятием слоя абразивными зернами – изменилось, что свидетельствует о переформировании в результате абразивной зачистки напряженно-деформированного поверхностного слоя.

Для получения конкретных значений напряжений и деформаций по глубине залегания исследуемой пластины возле отпечатка шарика необходимо создать линию маршрута (Path), начиная с поверхностного узла отпечатка шарика до узла рассматриваемой глубины (в данном случае на толщине 2,6 мм) по направлению оси OY. Созданная линия должна быть привязана к узлам конечных элементов. На рис. 6 представлена данная линия маршрута после привязки с путевыми узлами конечных элементов (всего 49 узлов) и генерация напряжений и деформаций, и по узлам в ней, а также график изменения остаточных напряжений по глубине залегания внутри пластины.

Так как в процессе эксплуатации панели и обшивки в авиационной технике работают на изгиб, главные и нормальные остаточные напряжения в поперечном сечении детали вызывают особый интерес к их исследованию. На рис. 7 представлены графики изменений средних значений главных напряжений по глубине залегания после удара шарика (ряд 1), после удара шарика и зачисткой первой партией абразивных зерен (ряд 2), двумя партиями абразивных зерен (ряд 3) и

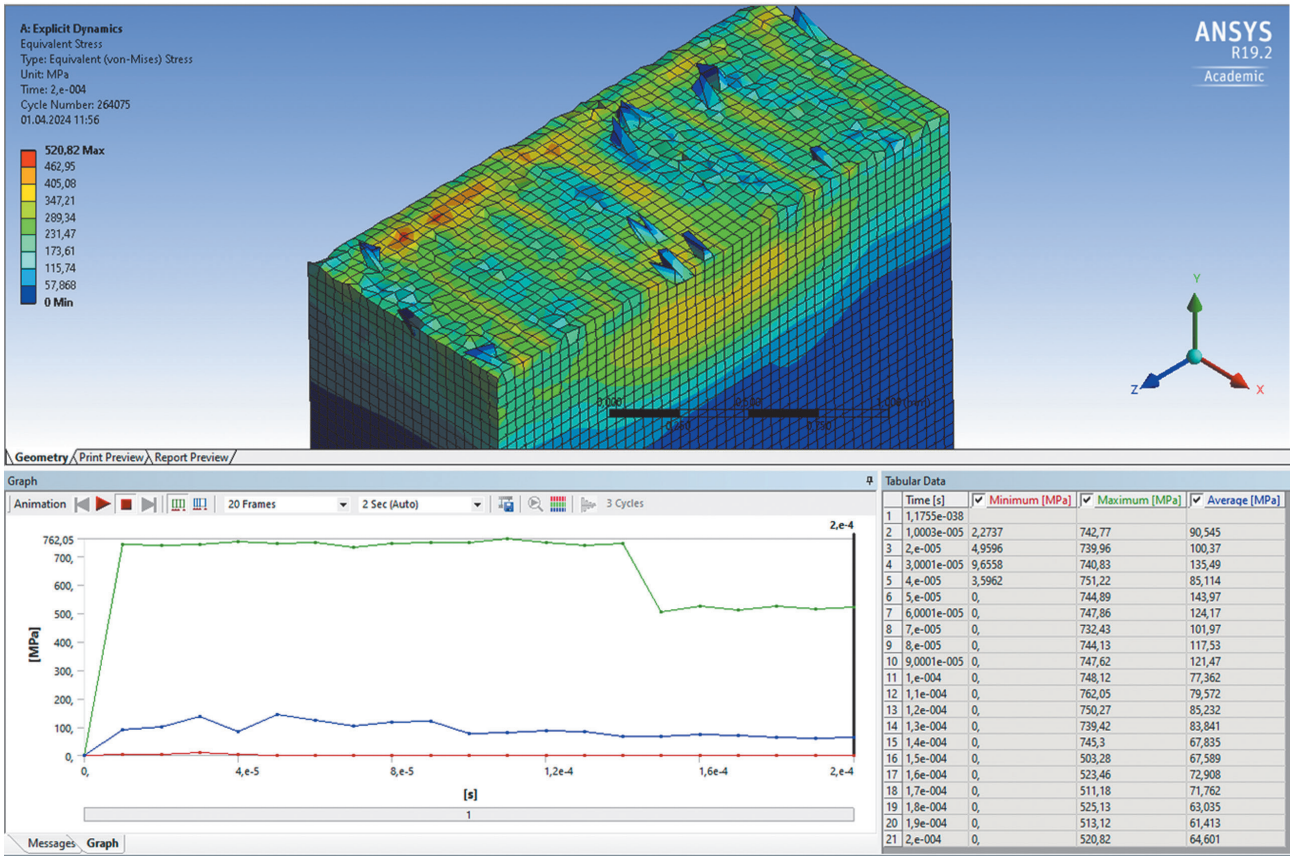


Рис. 5. *Напряженно-деформированное состояние пластины после удара шарика и зачистки тремя последовательными партиями абразивных зерен со снятием 25 мкм каждой*
Fig. 5. *Stress-strain state of the plate after the ball impact and grinding with three consecutive batches of abrasive grains with 25 micron removal each*

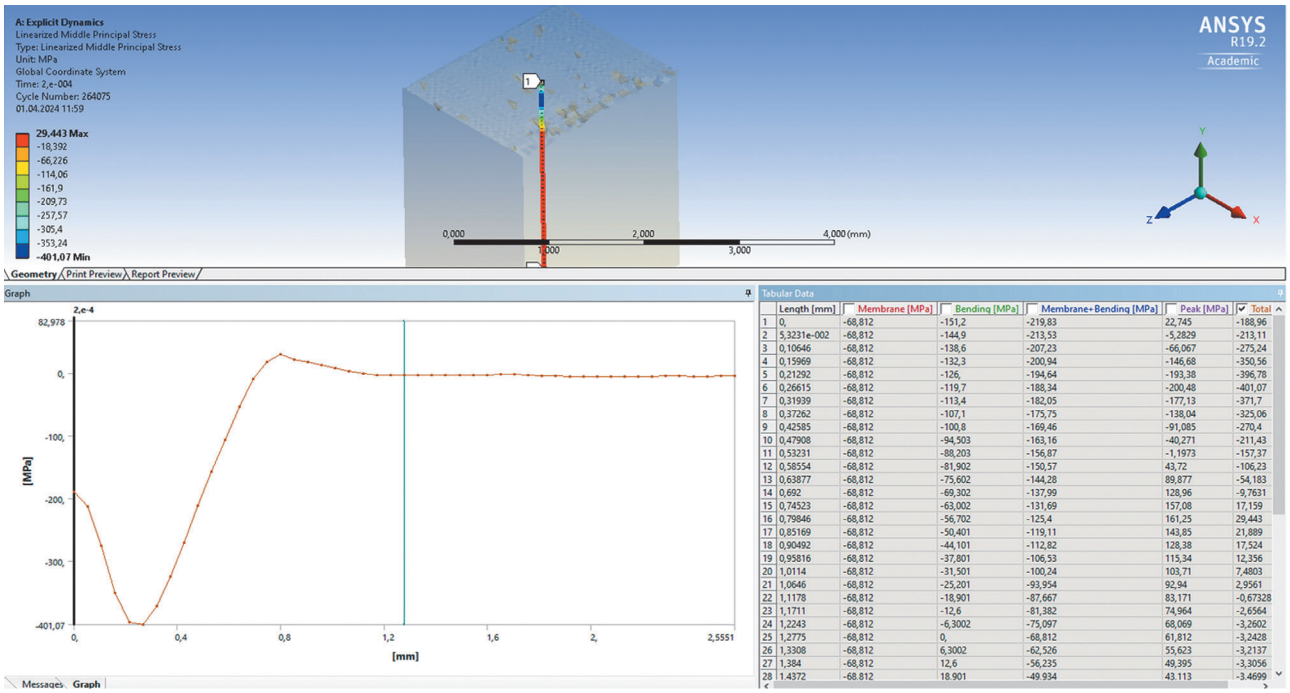


Рис. 6. *Создание линии маршрута и генерация остаточных напряжений по построенному маршруту*
Fig. 6. *Creating a route line and generating residual stresses along the constructed route*

тремя партиями абразивных зерен (ряд 4), возникающих в пластине под центром дна отпечатка шарика.

Проанализировав данные рис. 7–9, видно, что остаточные напряжения в пластине после удара шарика и удара шарика с последующей зачисткой абразивным зерном имеют различное распределение по глубине залегания в пластине. Однако общая конфигурация распределения остаточных напряжений сохраняется в том, что в самом верхнем слое пластины они сжимающие (с отрицатель-

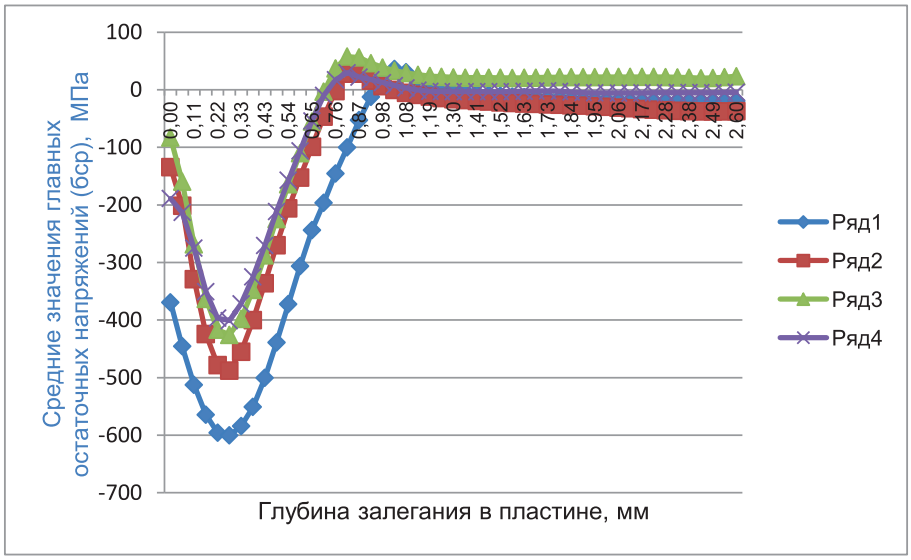


Рис. 7. *Средние значения главных остаточных напряжений по глубине залегания в пластине под центром дна отпечатка шарика, где ряд 1 – после удара шарика; ряд 2 – после удара шарика и зачистки первой партией абразивных зерен; ряд 3 – после удара шарика и зачистки двумя партиями абразивных зерен; ряд 4 – после удара шарика и зачистки тремя партиями абразивных зерен*
Fig. 7. *Average values of the main residual stresses by the plate depth under the center of the ball indent bottom, where 1 row is after the ball impact; 2 row is after the ball impact and grinding by the first batch of abrasive grains; 3 row is after the ball impact and grinding by two batches of abrasive grains; 4 row is after the ball impact and grinding by three batches of abrasive grains*

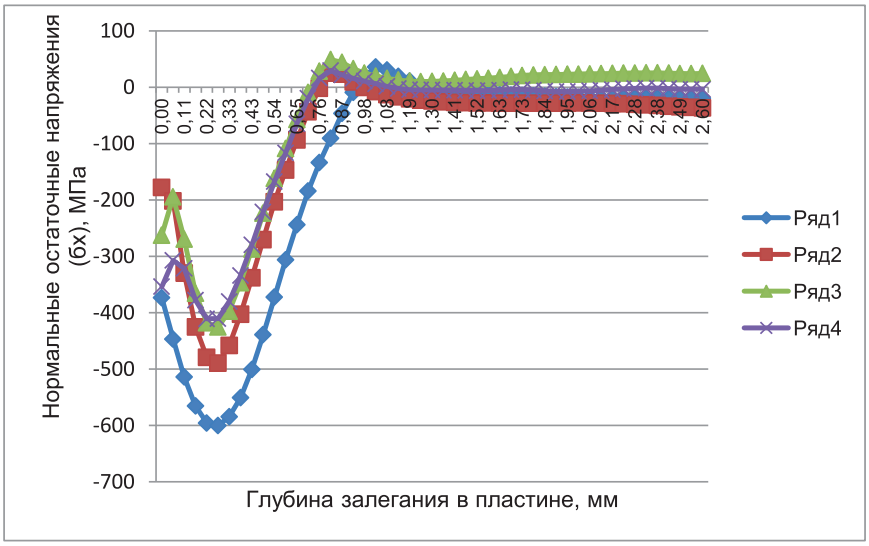


Рис. 8. *Нормальные остаточные напряжения в пластине под центром дна отпечатка шарика в поперечной плоскости (YOZ), где ряд 1 – после удара шарика; ряд 2 – после удара шарика и зачистки первой партией абразивных зерен; ряд 3 – после удара шарика и зачистки двумя партиями абразивных зерен; ряд 4 – после удара шарика и зачистки тремя партиями абразивных зерен*

Fig. 8. *Normal residual stresses in the plate under the center of the ball indent bottom in the transverse plane (YOZ), where 1row is after the ball impact; 2 row is after the ball impact and grinding by the first batch of abrasive grains; 3 row is after the ball impact and grinding by two batches of abrasive grains; 4 row is after the ball impact and grinding by three batches of abrasive grains*

ным знаком), а далее растягивающие (с положительным знаком), и чем глубже в пластине, тем стремительнее приближаются к нулю.

Значения сжимающих напряжений после удара шарика о пластину существенно уменьшаются с выполнением зачистки первой партией абразивных зерен (на более 100 МПа при снятии слоя 25 мкм абразивным зерном). С последующим же выполнением зачистки второй и третьей партиями

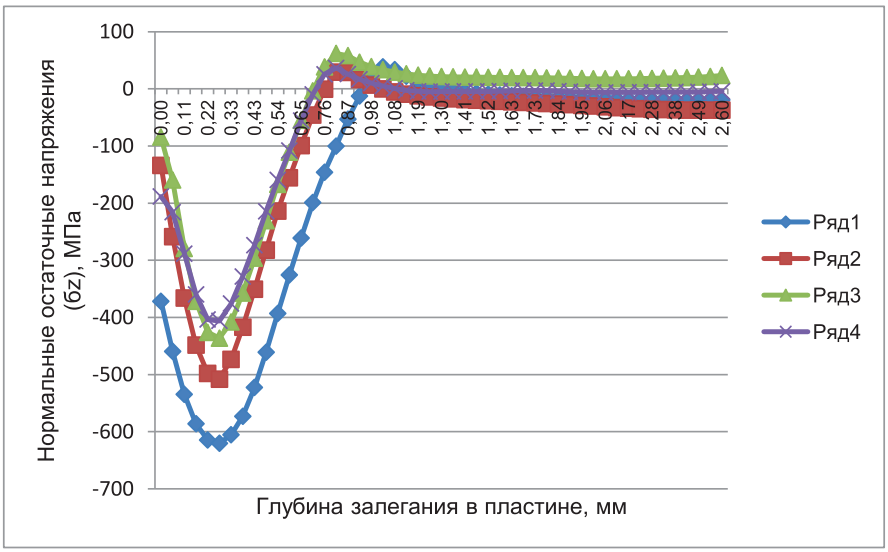


Рис. 9. *Нормальные остаточные напряжения в пластине под центром дна отпечатка шарика в поперечной плоскости (XOY), где ряд 1 – после удара шарика; ряд 2 – после удара шарика и зачистки первой партией абразивных зерен; ряд 3 – после удара шарика и зачистки двумя партиями абразивных зерен; ряд 4 – после удара шарика и зачистки тремя партиями абразивных зерен*

Fig. 9. *Normal residual stresses in the plate under the center of the ball indent bottom in the transverse plane (XOY), where 1 row is after the ball impact; 2 row is after the ball impact and grinding by the first batch of abrasive grains; 3 row is after the ball impact and grinding by two batches of abrasive grains; 4 row is after the ball impact and grinding by three batches of abrasive grains*

абразивных зерен максимальные значения сжимающих напряжений уменьшаются не так существенно (при последующем снятии слоя материала порядка 50 мкм абразивным зерном максимальное значение сжимающих остаточных напряжений составило около 100 МПа).

Максимальные значения растягивающих напряжений несущественно меняются как после удара шарика, так и после удара шарика с одной, двумя и тремя операциями зачистки. После удара шарика и последующей зачисткой одним, двумя и тремя партиями абразивных зерен глубина залегания сжимающих остаточных напряжений имеет близкое значение. Однако на рис. 7–9 хорошо видно, что глубина залегания сжимающих остаточных напряжений после удара шарика и после удара с выполнением зачистки во всех рассматриваемых случаях отличается на одинаковую величину.

Таким образом, образованные после зачистки лепестковым кругом поверхности, предварительно обработанной дробью, остаточные напряжения приводят к их перераспределению по глубине и уменьшению значений, полученных после обработки дробью, как по абсолютному значению, так и по глубине их залегания, но сохраняя при этом форму распределения в поверхностном слое.

В дальнейшем полученные исследования помогут составить базу данных зависимости режимных параметров и полученных значений остаточных напряжений, что в свою очередь позволит сопоставить данные моделирования с экспериментальными данными и уменьшить количество натурных экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на множество допущений, принятых при моделировании процесса дробеударной обработки с последующей зачисткой лепестковым кругом, разработанная конечно-элементная модель в среде программы инженерного анализа Ansys позволяет провести предварительное аналитическое исследование напряженно-деформированного состояния обрабатываемой детали как для дробеударной обработки, так и для технологической последовательности дробеударная обработка – зачистка лепестковым кругом, учитывая свойства материла детали и технологических параметров процессов, а также условий обработки.

Результаты исследований показали, что остаточные напряжения в зоне отпечатков дроби после дробеударной обработки и дробеударной обработки с последующей зачисткой лепестковым кругом, несмотря на сохранение конфигурации распределения по глубине залегания, уменьшились в значении в зависимости от толщины снимаемого слоя материала при зачистке (припуска). Таким образом, для сохранения формы детали после дробеударного формообразования в допустимых пределах при определении припуска на зачистку лепестковым кругом после операции дробеударного формообразования обязательно необходимо учитывать данный факт.

Список источников

1. Асланян И.Р., Бубнов А.С., Емельянов В.И., Исаев А.Н., Зайдес С.А., Копылов Ю.Р. [и др.]. Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием: монография. Иркутск: ИрГТУ, 2014. 560 с. EDN: TJNGHP.
2. Пашков А.Е. Об особенностях применения отечественной и зарубежной технологии формообразования обшивок и панелей самолетов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 5. С. 17–22. EDN: TVQUBR.
3. Пашков А.Е., Шматков В.С. Особенности технологии дробеударного упрочнения крупногабаритных деталей самолетов // Управление технологическими процессами машиностроительного производства: сб. ст. Иркутск: Иркут. гос. техн. ун-т, 1998. С. 62–66.
4. Гребенников Д.С., Максименков В.И. Формообразование панелей крыла дальнемагистрального самолета // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 1. С. 116–121. https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.1.018. EDN: YXBRRZ.
5. Назаров С.Р., Шодмонкулов З.А. Определение глубины деформационного упрочнения на основе энергетических соотношений дробеударной обработки // LIV Международная научно-техническая конференция преподавателей и студентов: материалы докладов (г. Витебск, 28 апреля 2021 г.). Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2021. Т. 2. С. 279–281. EDN: VXRTFS.

6. Кравченко Г.Н., Кравченко К.Г. Выбор технологических параметров дробеударного упрочнения силовых деталей авиационных конструкций // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2018. № 12. С. 37–44. EDN: PJSWFF.
7. Baragetti S. Three-dimensional finite-element procedures for shot peening residual stress field prediction // International Journal of Computer Applications in Technology. 2001. Vol. 14. Iss. 1-3. P. 51–63. https://doi.org/10.1504/IJCAT.2001.000260.
8. Miao H.Y., Larose S., Perron C., Lévesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening // Advances in Engineering Software. 2009. Vol. 40. Iss. 10. P. 1023–1038. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013.
9. Chen Zhuo, Yang Fan, Meguid S.A. Realistic finite element simulations of arc-height development in shot-peened Almen strips // Journal of Engineering Materials and Technology. 2014. Vol. 136. Iss. 4. P. 041002. https://doi.org/10.1115/1.4028006.
10. Bhuvaraghan B., Srinivasan S.M., Maffeo B., McCLain R.D., Potdar Yo., Prakash O. Shot peening simulation using discrete and finite element methods // Advances in Engineering Software. 2010. Vol. 41. Iss. 12. P. 1266–1276. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2010.09.003.
11. Касимов Б.М.У., Муминов М.Р., Шин И.Г. Поверхностное упрочнение деталей технологических оборудований и моделирование напряженного состояния при дробеударной обработке // Междунар. науч. конф., посвящ. 150-летию со дня рождения проф. Н.А. Васильева: сб. науч. тр. (г. Москва, 26 мая 2021 г.). М.: Рос. гос. ун-т им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 2021. Т. 1. С. 122–127. EDN: JYSPLZ.
12. Пашков А.Е., Дияк А.Ю. Определение параметров дробеударного формообразования-упрочнения при помощи CAD/CAM/CAE систем // Управление технологическими процессами машиностроительного производства: сб. ст. Иркутск: Иркут. гос. техн. ун-т, 1998. С. 59–62.
13. Дрозд М.С., Осипенко А.П. Аналитическое исследование напряженного состояния при внедрении упругой сферы в упругопластическое полупространство // Металловедение и прочность металлов: сб. науч. тр. Волгоград: Волжский политехнический институт, 1977. Вып. 8. С. 58–68.
14. Матлин М.М., Мозгунова А.И., Лебский С.Л. Прогнозирование параметров упрочнения деталей машин путем поверхностного пластического деформирования // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2005. № 3. С. 52–55. EDN: HTKUGR.
15. Meguid S.A., Shagal G., Stranart J.C., Daly J. Tree-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses // Finite Elements in Analysis and Design. 1999. Vol. 31. Iss. 3. P. 179–191. https://doi.org/10.1016/S0168-874X(98)00057-2.
16. Лебеденко В.Г. Математическое моделирование процесса формирования геометрических параметров поверхностного слоя и параметров упрочнения при обработке деталей дробью // Вестник Донского государственного технического университета. 2008. Т. 8. № 4. С. 202–212. EDN: KPOCUD.
17. Пашков А.А. Моделирование процесса формообразования крупногабаритных деталей двойной кривизны на дробеметных установках контактного типа // Технология металлов. 2020. № 12. С. 19–28. https://doi.org/10.31044/1684-2499-2020-0-12-19-28. EDN: UUAYIZ.
18. Unyanin A.N., Khazov A.V. Cutting ability of abrasive grains in the processing of billets of plastic materials // Materials Science and Engineering: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: IOP Conference Series. 2019. Vol. 709. Iss. 2-1. P. 022054. https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/2/022054. EDN: BYFFES.
19. Lyukshin V.S., Shatko D.B., Strelnikov P.A. Study of the working face of a flexible grinding tool // Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations: IOP Conference Series. 2020. Vol. 734. Iss. 1. P. 12068. https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012068. EDN: BJODMK.
20. Baksa T., Adamek P., Hronek O., Zetek M. Degradation of a grinding wheel when grinding cermet materials and its influence on the grinding process // Manufacturing Technology. 2019. Vol. 19. Iss. 1. P. 9–13. https://doi.org/10.21062/ujep/236.2019/a/1213-2489/MT/19/1/9.
21. Romanenko A., Shatko D., Nepogozhev A., Strelnikov P. Study of the Influence of the grinding wheel composition components on its performance during ID grinding // Smart Innovation, Systems and Technologies / eds. M. Shamtsyan, M. Pasetti, A. Beskopylny. Singapore: Springer, 2022. Vol. 247. P. 213–222. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_23. EDN: BNBMHF.
22. Сапунов В.В., Евстигнеев А.Д., Чистяков В.С. Исследование работоспособности лепестковых шлифовальных кругов при обработке заготовок из алюминиевых сплавов // Инновации в машиностроении: сб. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти д-ра техн. наук, профессора Рахимянова Хариса Магсумановича (г. Новосибирск, 7–9 октября 2021 г.). Новосибирск: НГТУ, 2021. С. 112–118. EDN: KATTWZ.
23. Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Нгуен Минь Хоанг. Моделирование формирования основных параметров качества поверхностного слоя при дробеударном упрочнении деталей // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сборник статей XIV Междунар. науч.-техн. конф. (г. Иркутск, 21–26 сентября 2020 г). Иркутск: ИРНИТУ, 2020. С. 104–112. EDN: JVBPIT.
24. Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А. Структура формирования параметров шероховатости поверхности при реализации технологической последовательности «дробеударное формообразование зачистка» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 12. С. 56–67. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-56-67. EDN: VRFUYI.

References

1. Aslanyan I.R., Bubnov A.S., Emel'yanov V.I., Isaev A.N., Zajdes S.A., Kopylov Yu.R., et al. *Part processing by surface plastic deformation: monograph*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2014, 560 p. (In Russ.). EDN: TJNGHP.
2. Pashkov A.E. On application features of domestic and foreign technology of aircraft skin and panel forming. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;5;17-22. (In Russ.). EDN: TVQUBR.
3. Pashkov A.E., Shmatkov V.S. Features of the shot peening hardening technology for large-sized aircraft parts. In: *Upravlenie tekhnologicheskimi processami mashinostroitel'nogo proizvodstva = Control of machine-building production technological processes*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 1998, p. 62-66. (In Russ.).
4. Grebennikov D.S., Maksimenkov V.I. Shaping wing panels of a long-haul aircraft. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2019;15(1):116-121. (In Russ.). https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.1.018. EDN: YXBRRZ.
5. Nazarov S.R., Shodmonkulov Z.A. Determination of the strain hardening depth based on energy relations of shot-impact processing. *LIV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya prepodavatelej i studentov: materialy dokladov = LIV International Scientific and Technical Conference of Teachers and Students: materials of reports*. 28 April 2021, Vitebsk. Vitebsk: Vitebsk State Technological University; 2021, vol. 2, p. 279-281. (In Russ.). EDN: VXRTFS.
6. Kravchenko G.N., Kravchenko K.G. Selection of technological parameters of shot blasting hardening of power parts of aircraft structures. *All-Russian Scientific-Technical Journal "Polyot" ("Flight")*. 2018;12:37-44. (In Russ.). EDN: PJSWFF.
7. Baragetti S. Three-dimensional finite-element procedures for shot peening residual stress field prediction. *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2001;14(1-3):51-63. https://doi.org/10.1504/IJCAT.2001.000260.
8. Miao H.Y., Larose S., Perron C., Lévesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Advances in Engineering Software*. 2009;40(10):1023-1038. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013.
9. Chen Zhuo, Yang Fan, Meguid S.A. Realistic finite element simulations of arc-height development in shot-peened Almen strips. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2014;136(4):041002. https://doi.org/10.1115/1.4028006.
10. Bhuvaraghan B., Srinivasan S.M., Maffeo B., McCLain R.D., Potdar Yo., Prakash O. Shot peening simulation using discrete and finite element methods. *Advances in Engineering Software*. 2010;41(12):1266-1276. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2010.09.003.
11. Kasimov B.M.U., Muminov M.R., Shin I.G. Surface hardening of parts of technological equipment and modeling of stress state during shot-shot processing. In: *Sbornik nauchnyh trudov Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 150-letiyu so dnya rozhdeniya professora N.A. Vasil'eva = Collected scientific works of the International scientific conference dedicated to the 150th birth anniversary of professor N.A. Vasiliev.* 26 May 2021, Moscow. Moscow: Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art); 2021, vol. 1, p. 122-127. (In Russ.). EDN: JYSPLZ.
12. Pashkov A.E., Diyak A.Yu. Determining shot peening parameters of shaping – hardening using CAD/CAM/CAE systems. In: *Upravlenie tekhnologicheskimi processami mashinostroitel'nogo proizvodstva = Control of machine-building production technological processes*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 1998, p. 59-62. (In Russ.).
13. Drozd M.S., Osipenko A.P. Analytical study of the stress state under elastic sphere introduction into an elastoplastic half-space. In: *Metallovedenie i prochnost' metallov: sbornik nauchnyh trudov = Metal science and strength of metals: collected scientific works*. Volgograd: Volga Polytechnic Institute; 1977, iss. 8, p. 58-68. (In Russ.).
14. Matlin M.M., Mozgunova A.I., Lebskii S.L. Predicting parameters of machine part hardening by surface plastic deformation. *Scientific Journal "Bulletin of the Technological University"*. 2005;3:52-55. (In Russ.). EDN: HTKUGR.
15. Meguid S.A., Shagal G., Stranart J.C., Daly J. Tree-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses. *Finite Elements in Analysis and Design.* 1999;31(3):179-191. https://doi.org/10.1016/S0168-874X(98)00057-2.
16. Lebedenko V.G. The mathematical description of process of formation of geometrical parameters of the superficial layer and hardening at processing details in fraction. *Vestnik of Don State Technical University*. 2008;8(4):202-212. (In Russ.). EDN: KPOCUD.
17. Pashkov A.A. Simulation of shaping process of large-sized bi-curvature components on shotblast units of contact type. *Tekhnologiya metallov*. 2020;12:19-28. (In Russ.). https://doi.org/10.31044/1684-2499-2020-0-12-19-28.EDN: UUAYIZ.
18. Unyanin A.N., Khazov A.V. Cutting ability of abrasive grains in the processing of billets of plastic materials. In: *Materials Science and Engineering: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: IOP Conference Series*. 2019;709(2-1):022054. https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/2/022054. EDN: BYFFES.
19. Lyukshin V.S., Shatko D.B., Strelnikov P.A. Study of the working face of a flexible grinding tool. In: *Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations: IOP Conference Series*. 2020;734(1):12068. https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012068. EDN: BJODMK.
20. Baksa T., Adamek P., Hronek O., Zetek M. Degradation of a grinding wheel when grinding cermet materials and its influence on the grinding process. *Manufacturing Technology*. 2019;19(1):9-13. https://doi.org/10.21062/ujep/236.2019/a/1213-2489/MT/19/1/9.
21. Romanenko A., Shatko D., Nepogozhev A., Strelnikov P. Study of the Influence of the grinding wheel composition components on its performance during ID grinding. In: Shamtsyan M., Pasetti M., Beskopylny A. (eds.). *Smart Innovation, Systems and Technologies*. Singapore: Springer; 2022, vol. 247, p. 213-222. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_23. EDN: BNBMHF.
22. Sapunov V.V., Evstigneev A.D., Chistyakov V.S. Studying flap grinding wheel performance when processing workpieces made of aluminum alloys. In: *Innovacii v mashinostroenii: sbornik trudov HII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj*

konferencii, posvyashchennoj pamyati doktora tekhnicheskih nauk, professora Rahimyanova Harisa Magsumanovicha = Innovations in mechanical engineering: collection of works of the 12th International scientific and practical conference dedicated to the memory of Doctor of technical sciences, Professor Kharis Magsumanovich Rakhimyanov. 7–9 October 2021, Novosibirsk. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2021, p. 112-118. (In Russ.). EDN: KATTWZ.
23. Le Tri Vinh, Koltsov V.P., Nguen Min' Hoang. Modeling the formation of the main parameters of the surface layer quality under part shot peening. In: *Aviamashinostroenie i transport Sibiri: sbornik statej XIV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii = Aircraft engineering and transport of Siberia: collected articles of the 14th International scientific and technical conference*. 21–26 September 2020, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2020, p. 104-112. (In Russ.). EDN: JVBPIT.
24. Koltsov V.P., Le Tri Vinh, Starodubtseva D.A. Formation structure of surface roughness parameters at "shot peen forming – grinding" technological sequence implementation. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(12):56-67. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-56-67. EDN: VRFUYI.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ле Чи Винь,
к.т.н.,
доцент кафедры технологий и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
vinh_istu@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0680-9009

Кольцов Владимир Петрович,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры технологий и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
kolcov@ex.istu.edu
https://orcid.org/0000-0002-6924-9504

Стародубцева Дарья Александровна,
к.т.н.,
доцент кафедры технологий и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ starodybseva@ex.istu.edu
https://orcid.org/0000-0001-9953-1888

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tri Vinh Le,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Technology and Equipment for Machine-Building Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
vinh_istu@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6924-9504

Vladimir P. Koltsov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Technology and Equipment for Machine-Building Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
kolcov@ex.istu.edu
https://orcid.org/0000-0002-6924-9504

Daria A. Starodubtseva,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Technology and Equipment for Machine-Building Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ starodybseva@ex.istu.edu
https://orcid.org/0000-0001-9953-1888

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 09.11.2023 г.; одобрена после рецензирования 14.12.2023 г.; принята к публикации 15.03.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 09.11.2023; approved after reviewing 14.12.2023; accepted for publication 15.03.2024.

iPolytech Journal 2024. Т. 28. № 2. С. 214-223 ISSN 2782-4004 (print)
2024;28(2):214-223 ISSN 2782-6341 (online)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья
УДК 621
EDN: POBIKI
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-214-223

Анализ и выбор композиционного материала для изготовления изделий на этапе конструкторской подготовки производства

Д.В. Лобанов[1]✉, О.С. Рафанова[2]

[1,2]Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

Резюме. Цель – анализ и выбор новых материалов на этапе конструкторской подготовки производства изделий из композитов для замены общепринятых конструкционных металлов. В работе использовалась методика многокритериального анализа мультивариантных систем, основанная на матричном анализе. В качестве параметров сравнения, используемых в методике, могут выступать общеизвестные справочные данные, рекомендации по результатам научных исследований материалов, технико-экономические и качественные параметры методов формообразования изделий из этих материалов с учетом их специфических свойств. Проведен сравнительный анализ восьми разных материалов для конструирования изделий из полимерных композитов, ориентированный на замену общепринятых конструкционных материалов, при трех условиях сопоставимости. Первое условие – учет всех выбранных для сравнения физико-механических свойств материалов и их стоимости. При втором условии сопоставимости акцент сделан на пределы прочности материала, модуль упругости и стоимость. При третьем условии сопоставимости условия частично схожи со вторым условием, за исключением предела прочности на сжатие. Установлено, что наиболее рациональным композитом для конструирования изделий при первом и втором условии сопоставимости является базальтопластик, у которого наибольшее значение весового критериального коэффициента (q) в первом случае равно 0,3947, а во втором – 0,3955. При третьем условии сопоставимости оптимальным вариантом композиционного материала стал также углепластик, у которого достигнуто наибольшее значение q = 0,3341. Предложенная методика позволяет производить анализ и выбор не только материала для изготовления изделий, но и инструментального материала, режимов резания и геометрии инструмента с учетом накопленной в результате эмпирических исследований базы знаний. Произведена апробация разработанной методики при трех условиях сопоставимости. В результате проведенных теоретических исследований установлено, что применение разработанной методики может повысить эффективность подготовки производства в 2–3 раза (в зависимости от сложности оцениваемой системы).

Ключевые слова: подготовка производства, композиционные материалы, сравнительный анализ, свойства материалов, выбор, мультивариантная система

Для цитирования: Лобанов Д.В., Рафанова О.С. Анализ и выбор композиционного материала для изготовления изделий на этапе конструкторской подготовки производства // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 214–223. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-214-223. EDN: POBIKI.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Analysis and selection of composite material for the manufacture of products during the design preparation stage

Dmitry V. Lobanov[1]✉, Olesya S. Rafanova[2]

[1,2]I.N. Ulianov Chuvash State University, Cheboksary, Russia

Abstract. In this article, we set out to analyse and select new materials at the design preparation stage for the manufacture of composite products to replace conventional structural metals. In the study, a multi-criteria analysis of multivariate systems based on matrix analysis was used. For comparative examination, the well-known reference data, recommendations based on the scientific research of materials, as well as technical, economic and qualitative data of forming methods for these materials, were used, taking into account their specific properties. A comparative analysis was carried out for eight different materials used for the design of polymer composite products, aiming to replace conventional structural materials under three comparability conditions. The first condition considers all selected physical and mechanical properties of the materials and their costs. The second condition emphasises the

© Лобанов Д.В., Рафанова О.С., 2024

ultimate strength of the material, its elastic modulus and cost. The third condition is partially similar to the second condition, with the exception of the compressive strength. It was established that the most rational composite for the product design under the first and second conditions is a basalt fibre-reinforced polymer, with the highest weight criterion coefficient (*q*) of 0.3947 in the first case and 0.3955 in the second case. For the third condition of comparability, carbon fibre was found to be the optimal composite material with the highest *q* value of 0.3341. The methodology allows product materials, tool materials, cutting regimes and tool geometry to be analysed and selected based on the accumulated knowledge base derived from empirical research. The developed methodology was tested under the three comparability conditions. Theoretical studies showed that the use of the methodology could increase the efficiency of pre-production by 2–3 times, depending on the complexity of the evaluated system.

Keywords: production preparation, composite materials, comparative analysis, properties of materials, selection, multivariate system

For citation: Lobanov D.V., Rafanova O.S. Analysis and selection of composite material for the manufacture of products during the design preparation stage. *iPolytech Journal.* 2024;28(2):213-223. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-214-223. EDN: POBIKI.

ВВЕДЕНИЕ

Предъявляемые к различным изделиям требования в зависимости от условий эксплуатации постоянно изменяются. Например, прогрессивный материал должен обладать противоречивыми, на первый взгляд, характеристиками: высокими прочностными свойствами в сочетании с малой плотностью и уменьшением массы готового изделия. В связи с этим увеличивается доля создания и использования наноматериалов, керамики, дисперсных и композиционных материалов в машиностроении, авиастроении, судостроении, военной индустрии и медицине. Новые материалы имеют ряд преимуществ по сравнению с известными традиционными материалами, но могут быть более дорогостоящими и сложными в производстве [1–5]. Целесообразность применения новых материалов для изготовления изделий возможно определить, только оценив комплексно их параметры, стоимость, доступность и возможности обработки.

Как известно, композиты – это материалы, состоящие из двух или более компонентов, объединенных между собой различными способами в монолитное изделие, которые способны сохранить свои индивидуальные особенности[3] [6, 7]. Как правило, композиционные материалы состоят из матрицы и армирующего компонента. Матрица является составляющим элементом, обладающим постоянством по всему объему, компонент же является прерывным и разделенным в этом объеме упрочняющим элементом. Номенклатура композиционных материалов очень разнообразная и зависит от материала матрицы:

– композиты с полимерной матрицей (ПКМ);
– металлической матрицей (МКМ);
– керамической матрицей (ККМ);
– углеродной матрицей (ККМ).

По структурным характеристикам материала армирующего компонента композиты могут быть волокнистыми, слоистыми, дисперсно-упрочненными, упрочненными частицами, нанокомпозитами.

В настоящее время известно множество композитов, которые имеют свои уникальные свойства и области применения [6, 7]. Сдерживание применения данных материалов на производстве зачастую идет за счет недостаточной изученности свойств и отсутствия комплексного подхода для оптимального выбора материалов в меняющихся условиях производства. Критерии эффективности определяются в зависимости от типа производства и имеющихся ресурсов, которыми располагает предприятие. При разных типах производства критерии эффективности производства могут быть различными, но самыми основными остаются фондоотдача, производительность труда, качество изделий, энергозатраты, экономическая эффективность (получение прибыли) [8–13]. Так, при единичном производстве важным критерием эффективности является именно качество готового изделия. Критериями эффективности при серийном производстве могут быть как качество, так и производительность, в зависимости от размера партии (мелкосерийное, среднесерийное, крупносерийное производства). При массовом производстве одним из ос-

[3]Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С., Горбаткина Ю.А., Крыжановский В.К., Куперман А.М. [и др.]. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособ. / под ред. А.А. Берлина. 3-е испр. изд. СПб.: Профессия, 2011. 560 с.

новных критериев является производительность труда.

При любом типе производства на этапе конструкторской подготовки производства одной из актуальных задач является выбор новых материалов для изготовления изделия или же для замены общепринятых конструкционных металлов. В связи с этим необходима эффективная методика, которая бы позволила разносторонне проанализировать материалы с варьированием критериев эффективности и условий сопоставимости, в связи с чем задача становится многовариантной и мультивариантной [14–23].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ и выбор материалов на этапе конструкторской подготовки производства изделий из композиционных материалов за счет применения методики многокритериального анализа при разных условиях сопоставимости.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы имеют свои физико-механические свойства, эксплуатационные условия. Поэтому существует необходимость производить сравнительный анализ по выбранной группе композиционных материалов по их свойствам для каждого конкретного вида детали, а затем выбирать оптимальный вариант. Сравнительный анализ имеющихся композиционных материалов и выбор оптимального варианта в варьируемых условиях сопоставления можно произвести по методике, разработанной нами и описанной ранее [24, 25]. Методика основана на матричном анализе, где исходная матрица вероятностей решений $M(a_{ij})$ состоит из безразмерных элементов (a_{ij}), значения которых получаются путем кодирования значений параметров сравнения P_j, прошедших ранжирование с учетом приоритетности минимального или максимального значения параметра. Таким образом, строки матрицы представляют собой кодированные значения параметров, по которым ведется сравнительный анализ, соответственно, по одному из объектов сравнения. Количество строк – количество объектов сравнения. Выбирая варианты задач многофакторного анализа, ориентируясь на варианты ситуативных задач, проводятся расчеты в различных условиях сопоставимости. Причем чем больше вариантов сопоставимости, объектов и параметров их сопоставления, тем эффективнее использование предлагаемой методики. Далее, по составленной матрице смежности рассчитывается итерированная значимость каждого объекта сравнения Q_i с учетом приоритетности минимального или максимального значения параметров по формуле:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n} a_{ij}, \quad (1)$$

где n – количество сравниваемых объектов.

Численное значение итерированной значимости в последующем позволяет вычислить весовой критериальный коэффициент q_i для каждого объекта сравнения по формуле:

$$q_i = \frac{Q_i}{\sum_{j=1}^{n} Q_i}. \quad (2)$$

Максимальное численное значение весового критериального коэффициента сигнализирует о его приоритетности при заданных условиях сопоставимости.

Рассмотрим примеры анализ и выбора на этапе конструкторской подготовки производства вида композиционного материала на полимерной основе для изготовления изделий.

Полимерные композиционные материалы обладают свойствами, которые по некоторым показателям превышают свойства известных нам традиционных конструкционных материалов (стали, алюминиевых и титановых сплавов, древесины). Поэтому в данной статье акцент будет сделан на выбор из многообразия полимерных композиционных материалов, которыми предлагается заменить общепринятые конструкционные материалы.

В качестве исходных данных для проведения сравнительного анализа и выбора композиционных материалов предлагается использовать основные их физико-механические свойства, такие как:

– плотность P_1, кг/м^3, влияет на массу изделия из композита;

– теплопроводность P_2, Вт/м·К, воздействует на отдачу и поглощение тепла материалом;

– водопоглощение P_3 за 24 ч, %, влияет на впитывание композитами влаги, из-за

чего происходит их расслоение и разрушение, что отрицательно сказывается на производстве изделий из композиционных материалов;

– модуль упругости P_4, Гпа, характеризуется способностью композита упруго деформироваться при приложении к нему силы, он может изменяться в требуемом направлении в зависимости от схемы армирования материала;

– пределы прочности при, МПа: сжатии (P_5), изгибе (P_6) и растяжении (P_7) отражают пороговую величину, выше которой происходит разрушение изделия из композита.

Все вышеперечисленные свойства взяты из справочных материалов и находятся в общей доступности для предприятий[3] [7, 26–30].

В таблице представлены основные виды полимерных композитов с указанием физико-механических свойств данных материалов. Численные значения физико-механических свойств полимерных композиционных материалов представлены в таблице как средние значения. Для реализации методики составим матрицу смежности $M(a_{ij})$, строки которой будут отражать материалы сравнения O_i, – в нашем случаем полимерные композиционные материалы, а столбцы – параметры P_j, характеризующие эти объекты сравнения – физико-механические свойства композиционных материалов и стоимость.

Как видно выше, все перечисленные свойства имеют свои единицы измерения. Процесс кодирования значений в матрицу смежности может быть выполнен различными способами, в зависимости от выбранного метода сравнения и приоритета параметров. Далее, численные значения сводим в матрицу смежности $M(a_{ij})$, строки которой будут отражать сравниваемые между собой полимерные материалы O_i, а столбцы – параметры P_j, характеризующие физико-механические свойства данных материалов.

Для наглядности применения методики многокритериального анализа в расчет будут взяты параметры из таблицы и приняты следующие допущения: параметры P_1, P_2, P_3 – предпочтительны для конструкторских решений в минимальном значении критерия, в связи с этим необходимо принять их как кодированные безразмерные численные значения, которые складываются в элементы матрицы (a_{ij}), равные обратной величине критерия

$$\frac{1}{P_1}, \frac{1}{P_2}, \frac{1}{P_3}.$$

Для параметров P_4, P_5, P_6 P_7 приоритетно наибольшее численное значение, так как это позволит применять изделия из композитов в механически жестких условиях работы, поэтому целесообразно представить значения параметров, характеризующих объекты сравнения, в виде безразмерных элементов

Физико-механические свойства полимерных композиционных материалов
Physico-mechanical properties of polymer composite materials

Объекты сравнения	Параметры	Плотность, ρ, кг/м^3	Теплопроводность, λ, ккал/мм^2	Водопоглощение за 24 ч, %	Модуль упругости, Е, ГПа	Предел прочности, σ, МПа			Стоимость, руб.
						при сжатии	при изгибе	при растяжении	
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
O_1	Стеклопластик	1900	0,75	0,25	60	795	965	1700	75
O_2	Углепластик	1525	1,0	0,125	350	1115	1835	2500	2899
O_3	Базальтопластик	2400	1,0	0,355	50	5000	1650	1200	48
O_4	Бороластик	2100	0,6	0,075	260	1150	1700	1300	3700
O_5	Органопластик	1300	1,6	0,375	137,5	181,5	490	775	2390
O_6	Текстолит	1350	0,275	0,7	22,4	200	130	200	465
O_7	Стеклотекстолит	1750	0,335	0,425	21	400	350	220	470
O_8	Армидопластик	1275	0,3	0,9	143,5	325	650	2000	1630

матрицы (a_{ij}), равными прямым численным значениям P_4, P_5, P_6 P_7.

Также для выбора композитов существует необходимость учета их стоимости P_8 (руб.) [24, 28, 29]. Высокая стоимость композиционных материалов влияет на финансовые затраты предприятия, поэтому за кодированные безразмерное элементы матрицы (a_{ij}) принимаем численные значения $\frac{1}{P_8}$.

В качестве примера применения методики произведем анализ нескольких частных случаев ***в различных условиях сопоставимости:***

Первое: если брать во внимание, что на производстве при выборе конструкционного полимерного материала должны учитываться все физико-механические свойства и стоимость материала, произведем сравнительный анализ всех вышеперечисленных полимерных материалов (O_1...O_8) с учетом всех приведенных в таблице параметров, характеризующих данные материалы (P_1...P_8). Матрица смежности будет выглядеть следующим образом:

$$M(a_{ij}) = \begin{pmatrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 & P_8 \\ O_1 & \frac{1}{1900} & \frac{1}{0,75} & \frac{1}{0,25} & 60 & 795 & 965 & 1700 & \frac{1}{75} \\ O_2 & \frac{1}{1525} & \frac{1}{1,0} & \frac{1}{0,125} & 350 & 1115 & 1835 & 2500 & \frac{1}{2899} \\ O_3 & \frac{1}{2400} & \frac{1}{1,0} & \frac{1}{0,355} & 50 & 5000 & 1650 & 1200 & \frac{1}{48} \\ O_4 & \frac{1}{2100} & \frac{1}{0,6} & \frac{1}{0,075} & 260 & 1150 & 1700 & 1300 & \frac{1}{3700} \\ O_5 & \frac{1}{1300} & \frac{1}{1,6} & \frac{1}{0,375} & 137,5 & 181,5 & 490 & 775 & \frac{1}{2390} \\ O_6 & \frac{1}{1350} & \frac{1}{0,275} & \frac{1}{0,7} & 22,4 & 200 & 130 & 200 & \frac{1}{465} \\ O_7 & \frac{1}{1750} & \frac{1}{0,335} & \frac{1}{0,425} & 21 & 400 & 350 & 220 & \frac{1}{470} \\ O_8 & \frac{1}{1275} & \frac{1}{0,3} & \frac{1}{0,9} & 143,5 & 325 & 650 & 2000 & \frac{1}{1630} \end{pmatrix}$$

Полученные в результате вычислений значения весового критериального коэффициента формируем в итоговый вектор для анализируемых полимерных композиционных материалов:

$$q = \begin{pmatrix} 0,144 \\ 0,263 \\ 0,395 \\ 0,188 \\ 0,060 \\ 0,020 \\ 0,037 \\ 0,126 \end{pmatrix}$$

Второе: предположим, что при конструировании изделий из вышеперечисленных полимерных материалов (O_1...O_8) важны показатели (P_4...P_8). То есть производитель изделий из полимерных материалов не берет во внимание такие параметры, как плотность, теплопроводность и водопоглощение. Акцент при выборе делается на пределы прочности материала, модуль упругости и стоимость материала. При данных условиях матрица смежности будет выглядеть следующим образом:

$$M(a_{ij}) = \begin{pmatrix} & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 & P_8 \\ O_1 & 60 & 795 & 965 & 1700 & \frac{1}{75} \\ O_2 & 350 & 1115 & 1835 & 2500 & \frac{1}{2899} \\ O_3 & 50 & 5000 & 1650 & 1200 & \frac{1}{48} \\ O_4 & 260 & 1150 & 1700 & 1300 & \frac{1}{3700} \\ O_5 & 137,5 & 181,5 & 490 & 775 & \frac{1}{2390} \\ O_6 & 22,4 & 200 & 130 & 200 & \frac{1}{465} \\ O_7 & 21 & 400 & 350 & 220 & \frac{1}{470} \\ O_8 & 143,5 & 325 & 650 & 2000 & \frac{1}{1630} \end{pmatrix}$$

Значения весового критериального коэффициента при втором условии сопоставимости для анализируемых полимерных композиционных материалов в этом случае выглядит так:

$$q = \begin{pmatrix} 0{,}1445 \\ 0{,}2627 \\ 0{,}3955 \\ 0{,}1879 \\ 0{,}0602 \\ 0{,}0202 \\ 0{,}0369 \\ 0{,}1260 \end{pmatrix}$$

Третье: предположим, что при конструировании изделий из вышеперечисленных полимерных материалов ($O_1 ... O_8$) важны параметры (P_4, P_6, P_7, и P_8). То есть условия частично схожи со вторым условием сопоставимости, но исключают еще предел прочности на сжатие, тогда матрица смежности будет выглядеть следующим образом:

$$M(a_{ij}) = \begin{pmatrix} & P_4 & P_6 & P_7 & P_8 \\ O_1 & 60 & 965 & 1700 & \frac{1}{75} \\ O_2 & 350 & 1835 & 2500 & \frac{1}{2899} \\ O_3 & 50 & 1650 & 1200 & \frac{1}{48} \\ O_4 & 260 & 1700 & 1300 & \frac{1}{3700} \\ O_5 & 137{,}5 & 490 & 775 & \frac{1}{2390} \\ O_6 & 22{,}4 & 130 & 200 & \frac{1}{465} \\ O_7 & 21 & 350 & 220 & \frac{1}{470} \\ O_8 & 143{,}5 & 650 & 2000 & \frac{1}{1630} \end{pmatrix}$$

Значение весового критериального коэффициента при втором условии сопоставимости для анализируемых полимерных композиционных материалов в этом случае будет выглядеть так:

$$q = \begin{pmatrix} 0{,}1705 \\ 0{,}3341 \\ 0{,}1834 \\ 0{,}2110 \\ 0{,}0810 \\ 0{,}0192 \\ 0{,}0326 \\ 0{,}1755 \end{pmatrix}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным композиционным материалом для конструирования изделий при первом и втором условиях сопоставимости является материал O_3 – базальтопластик, у которого наибольшее значение q в первом случае равно 0,3947, а втором – 0,3955. Вторым по приоритетности будет материал O_2 – углепластик, у которого значение q в первом случае равно 0,2626, а втором случае – 0,2627.

При третьем условии сопоставимости оптимальным вариантом композиционного материала стал O_2 – углепластик, у которого наибольшее значение q = 0,3341. Вторым по приоритетности будет материал O_4 – боропластик, у которого значение q = 0,2110 при заданных условиях сравнения. Также в заданных условиях сравнения можно увидеть, что материалы O_1, O_3, O_8 находятся на близком уровне, численные значения 0,1705; 0,1834 и 0,1755 соответственно.

Данные примеры являются только одними из многих решений, которые могут быть применены на практике, т.к. при решении практических задач в реальном производстве при выборе конструкционного материала изделий из композиционных материалов индивидуально определяются параметры, которые могут варьироваться и менять свою приоритетность в зависимости от условий эксплуатации изделий на момент принятия обоснованного решения, что характерно для обеспечения гибкости производства. В дальнейшем возможен уточняющий расчет либо с учетом дополнительных параметров, характеризующих композиты, либо по конкретным маркам композиционных материалов в выбранной группе. В результате проведенных теоретических исследований было установлено, что применение разработанной методики может повысить эффективность подготовки производства в 2–3 раза (в зависимости от сложности оцениваемой системы).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснованный выбор конструкционного материала – это сложная и комплексная задача, которая должна учитывать большое количество факторов: физико-механические

свойства для определения прочностных характеристик изделия в условиях эксплуатации конструкции, стоимость материала – для оценки экономической составляющей производства. Количество параметров в реальных условиях производства значительно выше, т.к. при учете не только конструкторской, но и технологической составляющей подготовки производства появляется дополнительно большое количество параметров и критериев, которые необходимо ранжировать исходя из условий сопоставимости на момент принятия решений. Использование методики анализа многокритериальных систем помогает улучшить качество конструкторско-технологической подготовки производства, сократить издержки и повысить конкурентоспособность продукции на рынке. Предложенная методика позволяет производить сравнительный анализ широкой гаммы объектов и систем при подготовке производства. С помощью нее возможно производить выбор не только материала для изготовления изделий, но и оптимальный выбор инструментального материала для обработки композиционных материалов, режимов резания и геометрии инструмента с учетом накопленной в результате эмпирических исследований базы знаний по методам лезвийной обработки таких материалов. В качестве параметров сравнения могут выступать общеизвестные справочные данные и рекомендации, технико-экономические и качественные параметры обработки. При изменении приоритетности параметров условия сопоставимости могут меняться, образуя возможные множества мультивариантной системы.

Список источников

1. Рычков Д.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Базаркина В.В. Совершенствование технологии формообразования высокопрочных стекловолокнистых композиционных материалов на полимерной основе // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2012. № 3. С. 150–153. EDN: PDETAD.
2. Плотников В.В., Шалунов Е.П., Смирнов В.М., Миллин А.Б. Жаропрочные и износостойкие железомедные композиционные материалы для деталей тяжело нагруженных пар трения // Актуальные проблемы в машиностроении. 2023. Т. 10. № 3-4. С. 57–62. EDN: TNKYOK.
3. Владимирова Ю.О., Данилов П.Г., Шалунов Е.П. Использование жаропрочных и износостойких материалов для теплонапряженных деталей узлов трения // Современные технологии: проблемы и перспективы: сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. для аспирантов, студентов и молодых ученых (г. Севастополь, 19–22 апреля 2021 г.). Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2021. С. 14–18. EDN: KAAKSC.
4. Данилов П.Г., Владимирова Ю.О., Шалунов Е.П. Анализ современных материалов и использование наиболее оптимальных из них для подшипников скольжения коленчатого вала высокофорсированных дизельных двигателей // Актуальные проблемы в машиностроении. 2020. Т. 7. № 3-4. С. 69–76. EDN: FOUXMT.
5. Лобанов Д.В., Владимирова Н.А., Рафанова О.С. Особенности процесса лезвийной обработки полимерных композиционных материалов и формообразования режущего инструмента // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Пермь, 14–15 декабря 2020 г.). Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2021. С. 141–144. EDN: ULQBJN.
6. Davim J.P., Reis P., Antonio C.C. Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up // Composites Science and Technology. 2004. Vol. 64. Iss. 2. P. 289–297. https://doi.org/10.1016/s0266-3538(03)00253-7. EDN: KJOAAL.
7. Капитонов А.М., Редькин В.Е. Физико-механические свойства композиционных материалов. Упругие свойства: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. 532 с. EDN: RLSKQR.
8. Подгорный Ю.И., Скиба В.Ю., Мартынова Т.Г., Максимчук О.В. Исследование и выбор параметров при проектировании технологических машин: монография. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2020. 260 с. EDN: VZWWWY.
9. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В., Заостровский А.С. Качество поверхности при обработке резанием полимерных композиционных материалов // Справочник. Инженерный журнал. 2016. № 9. С. 3–6. https://doi.org/10.14489/hb.2016.09.pp.003-006. EDN: WHMBNT.
10. Пушнин В.Н., Корнев Д.Ю., Вахрушев Н.В., Скиба В.Ю., Парц К.А. Прогнозирование технических характеристик интегрального технологического оборудования // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 2. С. 97–101. EDN: TFUZMX.
11. Иванцивский В.В., Скиба В.Ю., Степанова Н.П. Методика назначения рациональных режимов поверхностной закалки сталей с использованием концентрированных источников нагрева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2006. № 4. С. 17–19. EDN: OWRQVT.
12. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Программные продукты для автоматизации подготовки инструментального производства на предприятиях // Ползуновский альманах. 2008. № 4. С. 214–216. EDN: QBSVKN.

13. Татанов П.В., Шнайдер Д.А., Янюшкин А.Р., Янюшкин А.С. Влияние износа оборудования на качество изготовления изделий из композиционных материалов // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2022. № 10. С. 34–41. https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-10-34-41. EDN: OFCPCS.
14. Марков А.М., Маркова М.И., Дронова О.Б. Управление технологической подготовкой механической обработки // Актуальные проблемы в машиностроении. 2016. № 3. С. 511–516. EDN: VWUWGN.
15. Kovalev S.P., Nelyub V.A., Shelofast V.V. Multi-criteria analysis of aircraft structures fracture // Russian Aeronautics. 2015. Vol. 58. Iss. 4. P. 370–375. https://doi.org/10.3103/S1068799815040029. EDN: WVKPKV.
16. Зубарев Ю.М., Солнцев Н.Н., Вебер А.В., Веденов В.Н., Барсуков В.А. Инжиниринг проектной и технологической подготовки производства // Справочник. Инженерный журнал. 2021. № 12. С. 28–31. https://doi.org/10.14489/hb.2021.12.pp.028-031. EDN: KKBTKL.
17. Макаров В.Ф., Туктамышев В.Р., Масленков С.В., Катаев Я.А., Койнов И.И., Трепезаева О.И. Автоматизация конструкторско-технологической подготовки производства на основе синхронного подхода // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2014. № 9. С. 35–39. EDN: STBWZJ.
18. Skorobogatov A., Kobzev V. Fuzzy-multiple approach in design and technology management modeling preparation of production at machine-building enterprises // Sustainable Development and Engineering Economics. 2022. Iss. 3. P. 23–39. https://doi.org/10.48554/SDEE.2022.3.2. EDN: IMNCVA.
19. Kozłowska Ju. Methods of multi-criteria analysis in technology selection and technology assessment: a systematic literature review // Engineering Management in Production and Services. 2022. Vol. 14. Iss. 2. P. 116–137. https://doi.org/10.2478/emj-2022-0021. EDN: GRZITX.
20. Barfod M.B., Salling Kim Bang, Leleur S. Composite decision support by combining cost-benefit and multi-criteria decision analysis // Decision Support Systems. 2011. Vol. 51. Iss. 1. P. 167–175. https://doi.org/10.1016/j.dss.2010.12.005. EDN: OLNCJF.
21. Kochetkov A.V., Melnikov P.A., Zakharov O.V., Bobrovskij I.N., Bobrovskij N.M., Kushnikov V.A. Analysis of stationary means of measurement filters with optimum sensitivity // Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine: III International Scientific Conference (Tomsk, 23–26 May 2016). Tomsk: Atlantis Press, 2016. P. 520–523. EDN: XWUSZF.
22. Yatsalo B., Korobov A., Martínez L. Fuzzy multi-criteria acceptability analysis: a new approach to multi-criteria decision analysis under fuzzy environment // Expert Systems with Applications. 2017. Vol. 84. P. 262–271. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.05.005. EDN: XMYAAQ.
23. Ilchenko I.A., Pegashkin V.F. Mutual optimization of design and process preparation of production in mechanical engineering // Proceedings of the 16th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy (Nizhny Tagil, 17–19 June 2021). Nizhny Tagil, 2022. Vol. 2456. Iss. 1. P. 030028. https://doi.org/10.1063/5.0074789.
24. Лобанов Д.В., Рафанова О.С. Последовательность и критерии выбора оптимального варианта производственной системы // Актуальные проблемы в машиностроении. 2023. Т. 10. № 1-2. С. 21–27. EDN: LPAINJ.
25. Лобанов Д.В., Рафанова О.С. Методика критериального анализа мультивариантных систем // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2023. Т. 25. № 1. С. 85–97. https://doi.org/10.17212/1994-6309-2023-25.1-85-97. EDN: MKIZCO.
26. Францев М.Э., Кирейнов А.В. Результаты сравнительных испытаний композиционных материалов судостроительного назначения на основе стеклянных и базальтовых волокон на полиэфирном связующем на водопоглощение // Транспортные системы. 2019. № 1. С. 41–48. https://doi.org/10.46960/62045_2019_1_41. EDN: VCSVDO.
27. Лобанов Д.В., Сидоренко С.А., Ющенко Д.А., Большешапова А.В. Анализ и рациональный выбор полимерных композиционных материалов для изделий по их физико-механическим свойствам // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 206–212. EDN: TZDYSF.
28. Лобанов Д.В., Рафанова О.С., Владимирова Н.А. Оценка экономичности лезвийной обработки композиционных материалов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2021. Т. 8. № 3-4. С. 30–35. EDN: XKDGBC.
29. Анциферов В.Н., Бездудный Ф.Ф., Белянчиков Л.Н., Бецофен С.Я., Бондаренко Г.Г., Бухаров С.В. [и др.]. Новые материалы / под науч. ред. Ю.С. Карабасова. М.: МИСИС, 2002. 736 с.
30. Пелевин Ф.В., Никифоров Н.А., Полежаев Ю.В., Рагуля А.В., Скороход В.В., Уварова К.В. [и др.]. Материалы и покрытия в экстремальных условиях: монография. В 3-х т. Т. 2. М.: Московский гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана, 2002. 296 с. EDN: VOQAQH.

References

1. Rychkov D.A., Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Bazarkina V.V. Perfection of technology of formation of the form of high-strength glass-fiber composite materials on the polymeric basis. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*. 2012;3:150-153. (In Russ.). EDN: PDETAD.
2. Plotnikov V.V., Shalunov E.P., Smirnov V.M., Millin A.B. Plotnikov V.V., Shalunov E.P., Smirnov V.M., Millin A.B. Heat-resistant and wear resistant iron-copper composite materials for parts of heavy-loaded friction pairs. *Actual Problems in Machine Building*. 2023;10(3-4):57-62. (In Russ.). EDN: TNKYOK.
3. Vladimirova Yu.O., Danilov P.G., Shalunov E.P. Use of heat-resistant and wear-resistant materials for heat-stressed parts of friction units. In: *Sovremennye tekhnologii: problemy i perspektivy: sbornik statej Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii dlya aspirantov, studentov i molodyh uchenyh = Modern technologies: problems and prospects: collected*

articles of the All-Russian scientific and practical conference for post graduates, students and young scientists. 19–22 April 2021, Sevastopol'. Sevastopol': Sevastopol State University; 2021, p. 14-18. (In Russ.). EDN: KAAKSC.
4. Danilov P.G., Vladimirova Yu.O., Shalunov E.P. Analysis of modern materials and use of the most optimal of them for the crankshaft sliding bearings of highly forced diesel engines. *Actual Problems in Machine Building*. 2020;7(3-4):69-76. (In Russ.). EDN: FOUXMT.
5. Lobanov D.V., Vladimirova N.A., Rafanova O.S. Edge-cutting features of polymer composite materials and cutting tool shaping. *Elektrofizicheskie metody obrabotki v sovremennoj promyshlennosti: materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov = Electrophysical processing methods in modern industry: materials of the 4th International scientific and practical conference of young scientists, postgraduates and students.* 14–15 December 2020, Perm'. Perm': Perm National Research Polytechnic University; 2021, p. 141-144. (In Russ.). EDN: ULQBJN.
6. Davim J.P., Reis P., Antonio C.C. Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up. *Composites Science and Technology*. 2004;64(2):289-297. https://doi.org/10.1016/s0266-3538(03)00253-7. EDN: KJOAAL.
7. Kapitonov A.M., Red'kin V.E. *Physico-mechanical properties of composite materials. Elastic properties*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2013, 532 p. (In Russ.). EDN: RLSKQR.
8. Podgornyj Yu.I., Skiba V.Yu., Martynova T.G., Maksimchuk O.V. Analysis and choice of parameters in designing technological machines. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2020, 260 p. (In Russ.). EDN: VZWWWY.
9. Zubarev Yu.M., Priemyshev A.V., Zaostrovskii A.S. Surface quality while machining of polymeric composite materials. *Handbook. An Engineering Journal*. 2016;9:3-6. (In Russ.). https://doi.org/10.14489/hb.2016.09.pp.003-006. EDN: WHMBNT.
10. Pushnin V.N., Kornev D.Yu., Vahrushev N.V., Skiba V.Yu., Parc K.A. Forecasting technical characteristics of integrated technological equipment. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki.* 2014;2:97-101. (In Russ.). EDN: TFUZMX.
11. Ivantsivskiy V.V., Skiba V.Yu., Stepanova N.P. Methodology for assigning rational modes of steel surface hardening using concentrated heating sources. *Metal Working and Material Science.* 2006;4:17-19. (In Russ.). EDN: OWRQVT.
12. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A. Software products for automating the preparation of tool production at enterprises. *Polzunovskij al'manah*. 2008;4:214-216. (In Russ.). EDN: QBSVKN.
13. Tatanov P.V., Shnader D.A., Yanyushkin A.R., Yanyushkin A.S. Depreciation effect on equipment reliability of manufacturing products made of composite materials. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2022;10:34-41. (In Russ.). https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-10-34-41. EDN: OFCPCS.
14. Markov A.M., Markova M.I., Dronova O.B. Technological preproduction for mechanical working. *Actual Problems in Machine Building.* 2016;3:511-516. (In Russ.). EDN: VWUWGN.
15. Kovalev S.P., Nelyub V.A., Shelofast V.V. Multi-criteria analysis of aircraft structures fracture. *Russian Aeronautics*. 2015;58(4):370-375. https://doi.org/10.3103/S1068799815040029. EDN: WVKPKV.
16. Zubarev Yu.M., Solntsev N.N., Weber A.V., Vedenov V.N., Barsukov V.A. Engineering of design and technological preparation of production. *Handbook. An Engineering Journal*. 2021;12:28-31. (In Russ.). https://doi.org/10.14489/hb.2021.12.pp.028-031. EDN: KKBTKL.
17. Makarov V.F., Tuktamyshev V.R., Maslenkov S.V., Kataev Ya.A., Koynov I.I., Trepezaeva O.I. Automation of design-engineering preparation of production on the base of synchronous approach. (In Russ.). *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2014;9:35-39. EDN: STBWZJ.
18. Skorobogatov A., Kobzev V. Fuzzy-multiple approach in design and technology management modeling preparation of production at machine-building enterprises. *Sustainable Development and Engineering Economics.* 2022;3:23-39. https://doi.org/10.48554/SDEE.2022.3.2. EDN: IMNCVA.
19. Kozłowska Ju. Methods of multi-criteria analysis in technology selection and technology assessment: a systematic literature review. *Engineering Management in Production and Services*. 2022;14(2):116-137. https://doi.org/10.2478/emj-2022-0021. EDN: GRZITX.
20. Barfod M.B., Salling Kim Bang, Leleur S. Composite decision support by combining cost-benefit and multi-criteria decision analysis. *Decision Support Systems*. 2011;51(1):167-175. https://doi.org/10.1016/j.dss.2010.12.005. EDN: OLNCJF.
21. Kochetkov A.V., Melnikov P.A., Zakharov O.V., Bobrovskij I.N., Bobrovskij N.M., Kushnikov V.A. Analysis of stationary means of measurement filters with optimum sensitivity. In: *Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine: 3d International Scientific Conference*. 23–26 May 2016, Tomsk. Tomsk: Atlantis Press; 2016, p. 520-523. EDN: XWUSZF.
22. Yatsalo B., Korobov A., Martínez L. Fuzzy multi-criteria acceptability analysis: a new approach to multi-criteria decision analysis under fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*. 2017;84:262-271. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.05.005. EDN: XMYAAQ.
23. Ilchenko I.A., Pegashkin V.F. Mutual optimization of design and process preparation of production in mechanical engineering. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy*. 17–19 June 2021, Nizhny Tagil. Nizhny Tagil; 2022, vol. 2456, Iss. 1, p. 030028. https://doi.org/10.1063/5.0074789.
24. Lobanov D.V., Rafanova O.S. Sequence and criteria for choosing the optimal variant of the production system. *Actual Problems in Machine Building.* 2023;10(1-2):21-27. (In Russ.). EDN: LPAINJ.

25. Lobanov D.V, Rafanova O.S. Methodology for criteria analysis of multivariant system. Metal Working and Material Science. 2023;25(1):85-97. (In Russ.). https://doi.org/10.17212/1994-6309-2023-25.1-85-97. EDN: MKIZCO.
26. Frantsev M.E., Kireinov A.V. Results of comparative water absorption tests of shipbuilding composite materials based on glass and basalt fibers on a polyester binder. *Transportnye sistemy*. 2019;1:41-48. (In Russ.). https://doi.org/10.46960/62045_2019_1_41. EDN: VCSVDO.
27. Lobanov D.V., Sidorenko S.A., Yushchenko D.A., Bolsheshapova A.V. Analysis and rational choice of polymer composite materials for products based on their physical and mechanical properties. *Actual Problems in Machine Building*. 2015;2:206-212. (In Russ.). EDN: TZDYSF.
28. Lobanov D.V., Rafanova O.S., Vladimirova N.A. Estimation of the economy of composite materials blade processing. *Actual Problems in Machine Building*. 2021;8(3-4):30-35. (In Russ.). EDN: XKDGBC.
29. Antsiferov V.N., Bezdudnyj F.F., Belyanchikov L.N., Betsofen S.Ya., Bondarenko G.G., Bukharov S.V., et al. *New materials*. Moscow: MISIS; 2002, 736 p. (In Russ.).
30. Pelevin F.V., Nikiforov N.A., Polezhaev Yu.V., Ragulya A.V., Skorohod V.V., Uvarova K.V., et al. *Materials and coatings in extreme conditions*. M.: Bauman Moscow State Technical University; 2002, 296 p. (In Russ.). EDN: VOQAQH.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лобанов Дмитрий Владимирович,
д.т.н., доцент,
профессор кафедры технологии машиностроения,
Чувашский государственный университет
им. И.Н. Ульянова,
428015, г. Чебоксары, Московский просп., 15, Россия
✉ lobanovdv@list.ru
https://orcid.org/0000-0002-4273-5107

Рафанова Олеся Сергеевна,
аспирант,
ассистент кафедры технологии машиностроения,
Чувашский государственный университет
им. И.Н. Ульянова,
428015, г. Чебоксары, Московский просп., 15, Россия
olesya-karamaeva89@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0560-4730

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry V. Lobanov,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology,
I.N. Ulianov Chuvash State University,
15 Moskovsky pr., Cheboksary 428015, Russia
✉ lobanovdv@list.ru
https://orcid.org/0000-0002-4273-5107

Olesya S. Rafanova,
Postgraduate Student,
Assistant Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology,
I.N. Ulianov Chuvash State University,
15 Moskovsky pr., Cheboksary 428015, Russia
olesya-karamaeva89@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-0560-4730

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 05.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 08.05.2024 г.; принята к публикации 15.05.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 05.04.2024; approved after reviewing 08.05.2024; accepted for publication 15.05.2024.

iPolytech Journal 2024. Т. 28. № 2. С. 224-237 ISSN 2782-4004 (print)
2024;28(2):224-237 ISSN 2782-6341 (online)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья
УДК 621.953-85
EDN: DQWDDT
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-224-237

Определение основных технических параметров проектируемой сверлильной машины с автоматической подачей

В.М. Свинин[1]✉, А.В. Шутенков[2], Б.Б. Пономарев[3]

[1-3]*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*

Резюме. Цель – выработка и обоснование комплекса технико-экономических требований для подготовки в условиях импортозамещения задания на проектирование отечественной сверлильной машины с автоматической подачей. Объектами исследований для сравнения явились сверлильные машины с автоматической подачей, выпускаемые фирмами Atlas Copco, Desoutter и Recoules. По аналогии с существующими сверлильными машинами с автоматической подачей для проектируемой машины установлены ограничения предельный вес до 6 кг и габаритные размеры до 320х110х450 мм. Выбор электродвигателей приводов вращения шпинделя и его осевой подачи проведен на основе примера обработки твердосплавным сверлом отверстия диаметром 12 мм в типовом смешанном пакете толщиной 58 мм из листов стали марки 30ХГСА, полимерных композиционных материалов на основе углепластика, титанового сплава марки Вт6 и алюминиевого сплава марки 1933. Требуемая мощность электродвигателей определена с использованием режимов резания, выбранных из действующих справочников и данных, полученных при натурных испытаниях сверления смешанного пакета на станке DMC 635 V с динамометрической плитой Kistler Type 9123CQ05. Осциллограммы осевой силы и крутящего момента показали, что наибольшее силовое сопротивление возникает при сверлении титанового сплава. Рассчитаны и подтверждены следующие величины для проектируемой сверлильной машины с автоматической подачей: требуемая мощность электрических приводов – 1,5 кВт (для привода подачи), 2,8 кВт (для привода вращения шпинделя). Максимальная требуемая частота вращения 1940 об/мин, максимальная требуемая подача 4,5 мм/об. Для дробления стружки и подавления возможных автоколебаний сверла предложено использовать создаваемые системой числового программного управления модуляции скоростей подачи и вращения шпинделя. В дальнейших исследованиях планируются изготовление опытного образца и испытание сверлильной машины с автоматической подачей, спроектированной по выданным рекомендациям.

Ключевые слова: сверлильная машина с автоматической подачей, смешанный пакет, технические параметры, Г- и Т-образная компоновка, пневматический и электрический привод, режимы и мощность резания

Благодарности. Исследование выполнено в рамках стратегического проекта ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» i.DIT – Байкальский центр цифровых производственных технологий (Программа «Приоритет 2030»).

Для цитирования: Свинин В.М., Шутенков А.В., Пономарев Б.Б. Определение основных технических параметров проектируемой сверлильной машины с автоматической подачей // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 224–237. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-224-237. EDN: DQWDDT.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Main technical parameters for designing a new self-feed drilling machine

Valery M. Svinin[1]✉, Anton V. Shutenkov[2], Boris B. Ponomarev[3]

[1-3]*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

Abstract. The aim is to develop and substantiate a complex of technical and economic requirements for the design of a self-feed drilling machine produced in the Russian Federation, which is particularly relevant in the context of import substitution. The study considers self-feed drilling machines produced by Atlas Copco, Desoutter and Recoules as references to match their performance and specifications. By analogy with these machines, the limiting weight and overall dimensions of the developed machine should be up to 6 kg and 320x110x450 mm,

© Свинин В.М., Шутенков А.В., Пономарев Б.Б., 2024

respectively. The selection of motors for spindle rotation and axial feed is carried out by drilling a hole with a diameter of 12 mm in a mixed 58 mm thick stack using a carbide drill. This stack includes steel sheets (30KhGSA grade), polymer composite materials (carbon fibre-based), titanium alloy (Vt6 grade) and aluminium alloy (1933 grade). The required power for the electric drives was determined using cutting conditions specified in reference manuals and by drilling tests of a mixed stack carried out using a DMC 635 V machine equipped with a Kistler 9123CQ05 plate dynamometer. Oscillograms of axial force and torque showed that the highest resistance occurs when drilling the titanium alloy. The following specifications were calculated and confirmed for the projected self-feed drilling machine: the required power for the electric drives is 1.5 kW for the feed drive and 2.8 kW for the spindle rotation drive. The maximum required rotation speed is 1940 rpm, and the maximum required feed rate is 4.5 mm/rev. In order to grind chips and suppress potential auto-oscillations of the drill, it is recommended that the modulations of the feed and spindle rotation speeds created by a computer numerical control system be used. Future research will involve the production and testing of a prototype self-feed drilling machine, designed in accordance with the provided recommendations.

Keywords: automatic feed drilling machine, mixed package, specifications, L- and T-shaped design, pneumatic and electric drive, cutting modes and power

Acknowledgements. The work presented in the article is implemented under the strategic project of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Irkutsk National Research Technical University” i.DIT – Baikal Center for Digital Production Technologies (Priority 2030 Program).

For citation: Svinin V.M., Shutenkov A.V., Пономарев В.В. Main technical parameters for designing a new self-feed drilling machine. *iPolytech Journal.* 2024;28(2):224-237. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-224-237. EDN: DQWDDT.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в конструкциях несущих элементов летательных аппаратов (ЛА), например, крыльях, стали широко применять смешанные пакеты листов из разнородных авиационных материалов: алюминиевых и титановых сплавов, стали и углепластика [1]. При относительно небольшой массе эти пакеты обеспечивают высокую нагрузочную способность несущих элементов. Стыковку узлов, изготовленных из смешанных пакетов, выполняют обычно посредством многорядного болтового или заклепочного соединений. В качестве примера можно привести соединение центроплана ЛА с консолью крыла. Для обеспечения требуемой точности взаимного расположения соединяемых узлов разделку отверстий под болты производят на сборочном участке, ограниченная площадь которого не позволяет разместить крупногабаритное металлорежущее оборудование. В авиастроении на начальном этапе использования смешанных пакетов отверстия в них сверлили и разделывали при помощи ручных пневматических дрелей [2]. При этом качество получаемых отверстий полностью зависело от квалификации рабочего. При ручной подаче неравномерность осевого усилия повышала шероховатость обработанной поверхности [3] и приводила к расслаиванию углепластика, входящего в состав пакета [4]. Высокий уровень брака при выполнении сверлильных операций приводил к увеличению времени сборки узлов и повышал себестоимость изготовления ЛА [5]. Для устранения указанных недостатков был создан новый, более технологичный тип ручного инструмента – сверлильная машина с автоматической подачей (СМАП)[4]. Применение этого инструмента позволило частично автоматизировать процесс обработки отверстий в смешанных пакетах на этапе стапельной сборки и снизить количество бракованных изделий. Перед сверлением СМАП закрепляют на смешанном пакете через кондуктор при помощи байонетного механизма. Сам кондуктор предварительно устанавливают на обрабатываемую поверхность с использованием болтов [6].

В отечественном авиастроении до сих пор используют импортные СМАП. Их поставка в Россию от зарубежных производителей в настоящее время ограничена. Этим объясняется острая потребность в создании отечественной конструкции СМАП, не уступающей импортным аналогам по техническим возможностям. Целью настоящей работы являются выработка и обоснование комплекса технико-экономических требований для подготовки в условиях импортозамещения

[4]Каталог фирмы Desoutter. Инструмент и решения для аэрокосмической промышленности. 2017. С. 18–21. Режим доступа: https://www.desouttertools.com/uploads/documents/5b991104c00d8_Инструмент%20и%20решения%20для%20аэрокосмической%20промышленности%20(Русский).pdf (дата обращения: 16.01.2024).

задания на проектирование отечественной СМАП инструмента.

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ СУЩЕСТВУЮЩИХ СВЕРЛИЛЬНЫХ МАШИН С АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДАЧЕЙ

СМАП представляют собой компактные переносные устройства, используемые преимущественно в авиастроении для обработки отверстий диаметром от 6 до 36 мм (чаще всего от 8 до 16 мм) в смешанных пакетах. К их основным техническим характеристикам можно отнести следующие: компоновку, тип привода, габаритные размеры, массу, потребляемую мощность, диапазоны частоты вращения инструмента и его осевой подачи, возможности удаления стружки и подавления вибраций инструмента [7]. Лидирующими производителями таких устройств являются фирмы Atlas Copco (Швеция), Desoutter (США), Recoules (Франция) и Lubbering (Германия). Внешний вид сверлильных машин представлен на рис. 1, а технические характеристики трех наиболее распространенных моделей приведены в табл. 1.

Все СМАП (см. рис. 1) имеют отчетливо выраженную Г- или Т-образную компоновку, включающую утоненную шпиндельную часть, приводную часть и компактное цанговое или байонетное крепление на кондукторе. Именно Т-образная форма машины позволяет размещать ее в стесненном пространстве собираемых узлов, а вынесенная рукоятка обеспечивает без затруднений возможность работы оператора. Пример закрепления СМАП через кондуктор для обработки

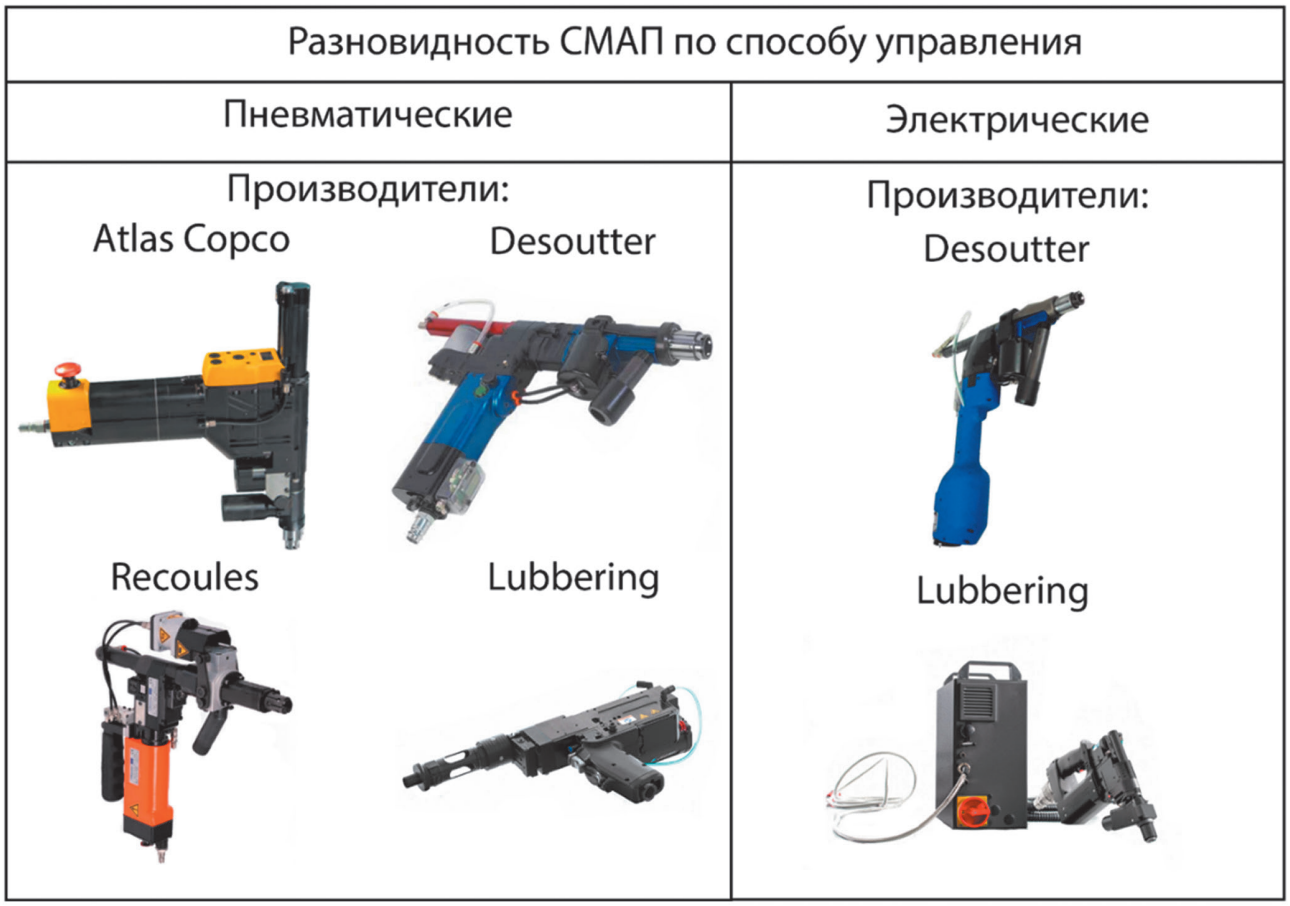


Рис. 1. *Внешний вид и компоновка наиболее распространенных сверлильных машин с автоматической подачей [5,6] [6]*
Fig. 1. *An image and configuration of the most common drilling machines with the automatic feed [5,6] [6]*

[5]Каталог фирмы Atlas Copco Industrrial tools and solutions. 2016. С. 284–286. Режим доступа: https://pdf.directindustry.com.ru/pdf-en/atlas-copco-tools/atlas-copco-industrial-tools-solutions-2016/8006-656778.html#open1824096 (дата обращения: 19.01.2024).

[6]Каталог фирмы Recoules. Материалы для сборки Авиационной техники Инструменты для Аэрокосмической промышленности. 2007. С. 5–26. Режим доступа: https://www.technisource.co.uk/wp-content/themes/technisource/assets/Recoules-Catalogue.pdf (дата обращения: 19.01.2024).

Таблица 1. Технические характеристики наиболее распространенных и вновь проектируемых сверлильных машин с автоматической подачей [5,6] [6]
Table 1. Specifications of the most common and newly designed drilling machines with the automatic feed [5,6] [6]

№	Фирма-производитель	Модель СМАП	Диаметры обрабатываемых отверстий, мм	Масса, кг	Габаритные размеры (длина х ширина х высота), мм	Диапазон частот вращения, об/мин	Диапазон подач, мм/об	Мощность привода, кВт
1	Atlas Copco	PFD-1500	8–16	5,5	320x110x450	38–2360 (ступенчатое регулирование)	0,023–0,33 (ступенчатое регулирование)	1,5
2	Desoutter	Evo Seti-Tec ST 2200	8–16	4,2	350x80x400	131–2195 (бесступенчатое регулирование)	0,032–0,33 (бесступенчатое регулирование)	2,8
3	Recoules	20932	6–10	2,1	120x80320	400–1400 (ступенчатое регулирование)	0,02–0,5 (ступенчатое регулирование)	0,75
4	СМАП ИРНИТУ	СМАП-01	8–16	Не более 6 кг	320x110x450	0–5820 (бесступенчатое регулирование)	0–4,5 (бесступенчатое регулирование)	2,8

отверстий в труднодоступном месте показан на рис. 2.

Из-за различия высот обрабатываемых узлов (см. рис. 2, размер 395 max*) длина СМАП может быть различной. Это накладывает ограничение на толщину обрабатываемого смешанного пакета. В случае, когда обработка пакета невозможна при стандартной конфигурации СМАП, принято применять сменные «носовые» части, закрепляемые в кондукторе (рис. 3).

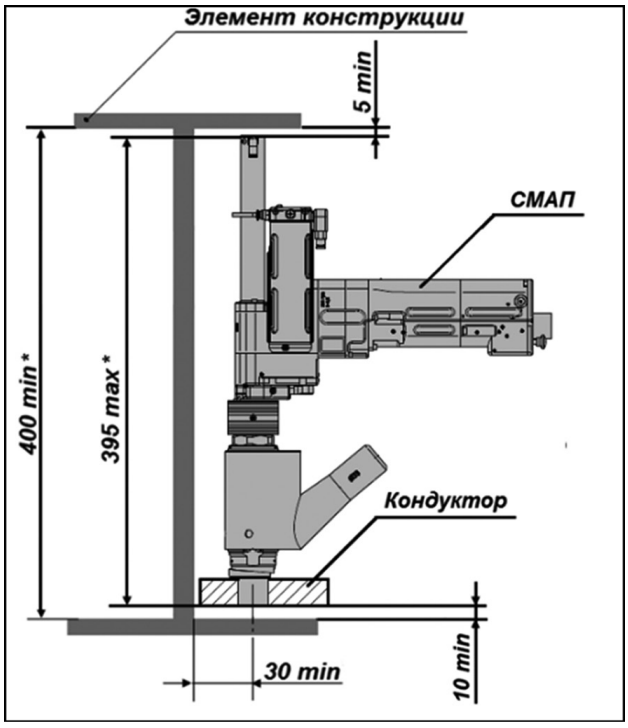


Рис. 2. *Пример установки сверлильной машины с автоматической подачей модели PDF-1500 для обработки отверстий в труднодоступном месте*[6]
Fig. 2. *A setup example of a PDF-1500 drilling machine for hole processing in hard-to-reach places*[6]

На практике наибольшее применение получили СМАП с пневматическим приводом. Одним из условий их использования является требование по электробезопасности на авиационных предприятиях, а также доступность в подключении питания от любой воздушной магистрали. Помимо этого, пневматический инструмент имеет малый вес, безопасен в обслуживании, прост в эксплуатации и позволяет создавать достаточный крутящий момент в ходе механической обработки. Безопасность использования пневматической СМАП достигается за счет низкого давления воздуха в системе (до 10 атм.). Достаточный крутящий момент обеспечивается расходной характеристикой и точным исполнением приводной лопасти.

Вместе с тем пневматические СМАП имеют ряд недостатков. Первый и основной недостаток – отсутствие бесступенчатого переключения и регулирования скоростей вращения и подачи инструмента. Настройка режимов резания на пневматических СМАП осуществляется путем замены редуктора, способного обеспечить только определенные параметры режимов резания в соответствии со своим передаточным числом[5]. Такое конструктивное решение накладывает определенные ограничения в выборе наиболее производительных режимов резания, а также приводит к удорожанию комплекта оборудования.

Вторым существенным недостатком пневматических СМАП является отсутствие управления по обратной связи. Из-за аналоговой природы управляющего сигнала пневматическая СМАП не способна адаптивно изменять режимы резания в процессе изготовления отверстий. Таким образом, при обработке смешанных пакетов с помощью пневматических СМАП оператор вынужден выбирать режимы резания по наиболее труднообрабатываемому материалу, занижая производительность механообработки в несколько раз [8].

Как известно, электрический привод в полной мере позволяет реализовать процесс регулирования момента на выходном звене механизма с элементами адаптации к условиям обработки. Поэтому в настоящее время ряд заказчиков и производителей считает наиболее перспективным применение в СМАП электрического привода (ЭСМАП). Особенность таких сверлильных машин заключается в возможности управления сигналом на основе обратной связи, обеспечивающей плавное и бесступенчатое переключение частоты вращения и подачи. Данный подход в управлении снижает количество требуемых редукционных блоков в конструкции машины, оставляя только необходимые, создающие достаточный крутящий момент при резании труднообрабатываемых материалов.

Целесообразность применения ЭСМАП при обработке отверстий в смешанных пакетах подтверждают результаты исследования, представленные в работе [9], основанные на сопоставлении условий обработки разнородных материалов, входящих в смешанный пакет. Наибольшая эффективность обработки достигается за счет возможности электропривода поддерживать рациональные режимы резания для каждого отдельного материала в пакете, тем самым сокращая суммарное время обработки отверстий и обеспечивая их качество.

Электрические мотор-редукторы по сравнению с пневматическими могут развивать больший по величине крутящий момент при равных массогабаритных характеристиках. Именно мощностная характеристика электрических СМАП является ключевой при проектировании и разработке российского аналога. Она определяет габариты, массу, мощность, а значит, и предельные крутящие моменты и, как следствие, возможность обработки определенных типов материалов.

Вес существующих сверлильных машин не превышает 5,5 кг (см. табл. 1). Для обеспечения мобильности и удобства эксплуатации вновь проектируемой машины ее допустимый вес по требованию производства не должен превышать 6 кг. В качестве предельных габаритов Т-образной компоновки машины предложено ориентироваться на размеры СМАП модели PDF-1500: 320х110х450 мм. По аналогии с моделями PDF-1500 и Evo Seti-Tec ST 2200 создаваемая машина должна обеспечивать обработку отверстий в смешанных пакетах в диапазоне диаметров от 8 до 16 мм.

Рис. 3. *Виды сменных носовиков для сверлильной машины с автоматической подачей фирмы Desoutter*
Fig. 3. *Types of removable nose pads for Desoutter drilling machine with the automatic feed*

Диапазоны частоты вращения шпинделя и его осевой подачи определяются требуемыми при сверлении отверстий режимами резания и возможностью их реализации приводом сверлильной машины.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ И ПОДАЧИ

Входящие в состав смешанного пакета разнородные конструкционные и композитные материалы требуют разных режимов механической обработки. Приводы сверлильной машины должны обеспечить при обработке каждого слоя пакета рациональные значения подачи, скорости и мощности резания. Определение требуемой мощности привода проектируемой сверлильной машины проведено для типового смешанного пакета, состоящего из титанового сплава марки Вт6 ГОСТ 19807-91, алюминиевого авиационного сплава марки 1933 ОСТ 1 90073-85, полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углепластика и легированной стали марки 30ХГСА ГОСТ 4543-71.

Для назначения режимов резания были использованы справочники[7,8], а также режимы резания, полученные опытным путем [10]. Принятый диаметр отверстия 12 мм соответствует середине диапазона диаметров отверстий, обрабатываемых с помощью СМАП (см. табл. 1). Режимы резания представлены в табл. 2.

На основании приведенных режимов резания можно сделать вывод о том, что для разрабатываемой ЭСМАП необходим двигатель привода главного движения мощностью не менее 9 кВт (см. табл. 2, режимы резания для 1933 по литературному источнику[8]). Однако применение двигателя такой мощности в конструкции ЭСМАП не позволит использовать ее в качестве ручного компактного инструмента из-за большой массы устройства и габаритных размеров. Параметр массы является определяющим и ограничен санитарно-эпидемиологическими правилами и нормативами СанПиН 2.2.2.540-96[9], согласно которым разрешенная масса любого ручного инструмента не должна превышать 7 кг.

Для уточнения требований по массоинерционным характеристикам устройства и режимам обработки было решено определить силовую нагрузку и мощность резания при

Таблица 2. Режимы резания материалов в составе смешанного пакета
Table 2. Cutting modes of mixed package materials

№	Обрабатываемый материал	Частота вращения n, об/мин	Подача f, мм/об	Момент резания M, Н·м	Мощность резания N, кВт
Литературный источник[7]					
1	Вт6	248,3	0,09	16,12	0,4
2	1933	1814,4	0,22	35,9	6,7
3	30ХГСА	300	0,24	16,2	0,5
4	ПКМ (углепластик)	–	–	–	–
Литературный источник[8]					
1	Вт6	1029,2	0,115	6,85	0,74
2	1933	5782,6	0,317	14,6	8,82
3	30ХГСА	2602,2	0,335	21	5,71
4	ПКМ (углепластик)	–	–	–	–
Литературный источник [10]					
1	Вт6	270	0,023	–	1,5
2	1933	1200	0,1	–	1,5
3	30ХГСА	270	0,023	–	1,5
4	ПКМ (углепластик)	600	0,023	–	1,5

[7]Баранчиков В.И., Жаринов А.В., Юдина Н.Д., Садыхов А.И. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: справочник. М.: Машиностроение, 1990. 400 с.

[8]Каталог фирмы Sandvik Coromant. Вращающиеся инструменты. Сверление. 2012. С. 8–26. Режим доступа: https://mirstan.ru/files/catalogs/sandvik/Sverlenie.pdf (дата обращения 16.01.2024).

[9]СанПиН 2.2.2.540-96. 2.2.2. Технологические процессы, сырье, материалы и оборудование, рабочий инструмент. Гигиенические требования к ручным инструментам и организации работ. Санитарные правила и нормы. Утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 04.07.1996. № 12.

сверлении смешанного пакета опытным путем на режимах резания по рекомендациям, представленным в работе[8]. Была проведена обработка серии отверстий в пакете общей толщиной 58 мм твердосплавным сверлом, изготовленным на Иркутском авиационном заводе – филиале ПАО ОАК «Яковлев». В состав типового для авиастроения смешанного пакета в последовательности их расположения вошли следующие материалы: 30ХГСА, ПКМ, Вт6 и 1933. Основные конструктивно-геометрические параметры инструмента имели значения: диаметр 12 мм, общая длина 158 мм, длина режущей части 120 мм, угол при вершине 140°, угол наклона винтовых стружечных канавок 30°. Главные режущие лезвия на уголках сверла характеризуются задним углом 5° и передним углом 20°.

Закрепление режущего инструмента осуществляли с помощью гидромеханического патрона 392.272HMD-40 20 085 через цанговый зажим CG 20 LOT 117 с диаметром 12 мм. Вариант закрепления был выбран для имитации закрепления сверла в системе СМАП и обеспечения подобия жесткости технологической системы во время резания. Проведенный модальный анализ подтвердил одинаковую жесткость закрепления сверла как в станке, так и в СМАП.

Сверление сквозных отверстий проводили на вертикально-фрезерном обрабатывающем центре DMC 635 V с системой ЧПУ Siemens 840D при частоте вращения шпинделя n = 1029 об/мин и осевой подаче f = 0,115 мм/об. Осевую силу резания и крутящий момент регистрировали с помощью динамометрической плиты Kistler Type 9123CQ05, а обработку полученных данных выполняли с использованием программного комплекса DynoWare компании Kistler. Экспериментальная установка представлена на рис. 4.

Рис. 4. *Экспериментальная установка для определения осевой силы резания и крутящего момента при обработке смешанного пакета*
Fig. 4. *Experimental setup to determine the axial cutting force and torque when mixed package processing*

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

На рис. 5 и 6 представлены осциллограммы изменения соответственно осевой

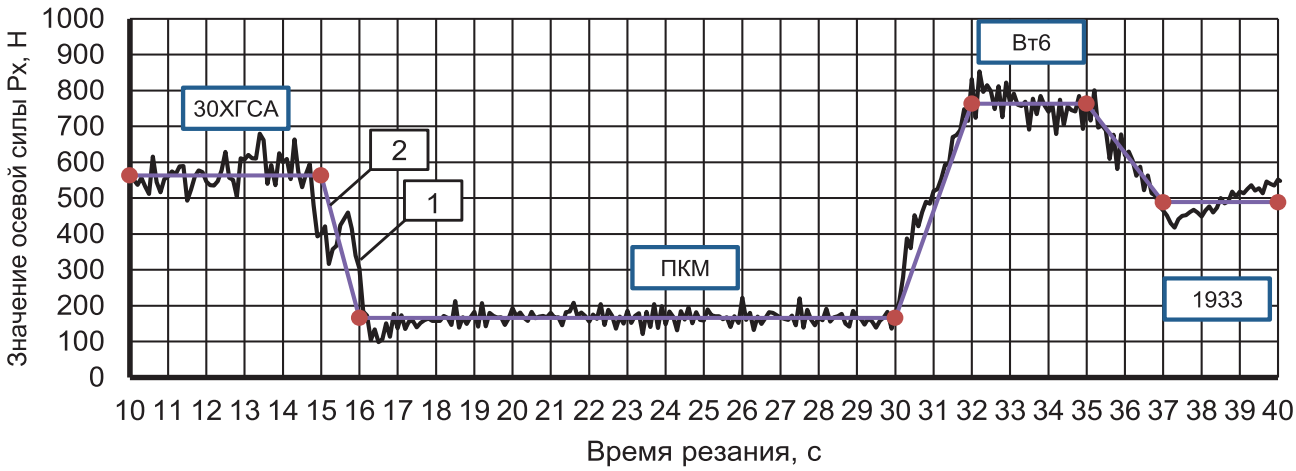


Рис. 5. *Осциллограмма осевой силы Px при сверлении отверстий в смешанном пакете (30ХГСА+ПКМ+Вт6+1933): 1 – мгновенное значение осевой силы Px; 2 – среднее значение осевой силы Px*
Fig. 5. *Oscillogram of the axial force Px when drilling holes in a mixed package (30KhGSA+PCM+Vt6+1933): 1 – instantaneous value of the axial force Px; 2 – average value of the axial force Px*

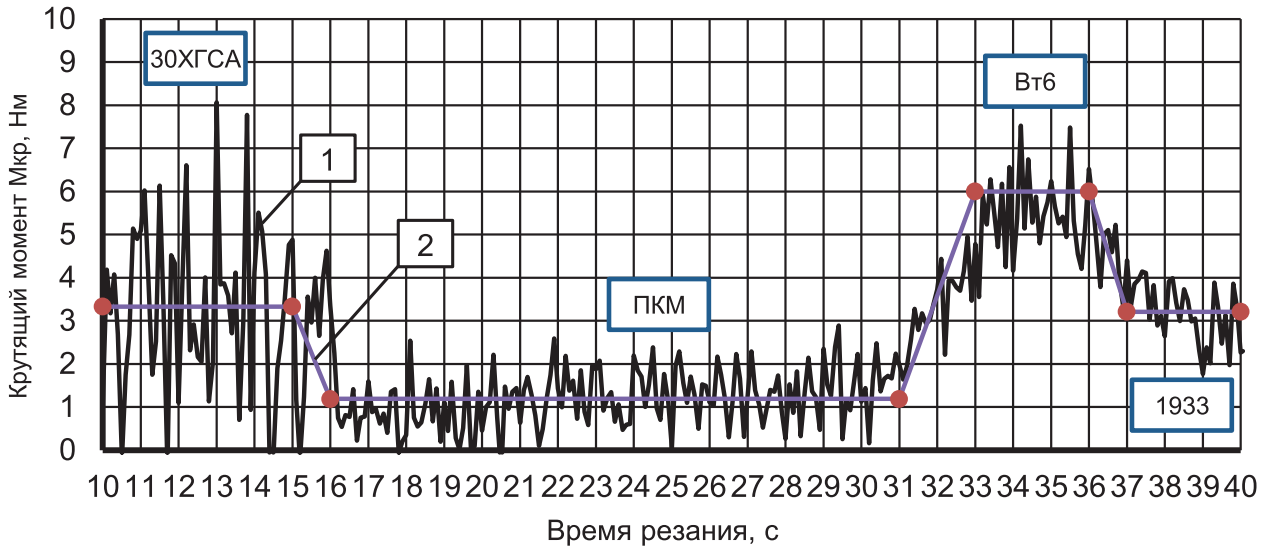


Рис. 6. *Осциллограмма крутящего момента Мкр при сверлении отверстий в смешанном пакете (30ХГСА+ПКМ+Вт6+1933): 1 – мгновенное значение крутящего момента Мкр; 2 – среднее значение крутящего момента Мкр*
Fig. 6. *Oscillogram of the Mkr torque when drilling holes in the mixed package (30KHGSA+PCM+Vt6+1933): 1 – instantaneous value of the Mkr torque; 2 – average value of the Mkr torque*

составляющей силы резания P_x и крутящего момента $M_{кр}$ при сверлении смешанного пакета.

На рис. 5 можно видеть, что максимальное значение осевой силы P_x возникает во время обработки титанового сплава марки Вт6 и составляет 853,5 Н. При этом среднее значение этой силы равно 790 Н. При обработке стали 30ХГСА осевая сила меньше: 680Н – максимальное значение и 600Н – среднее. Наименьшее силовое сопротивление создает ПКМ: 210 Н – максимальная сила и 170 Н – средняя.

Изменение крутящего момента $M_{кр}$ при прохождении инструментом разных слоев пакета колеблется в значительном диапазоне (см. рис. 6). Его пиковое значение 8,1 Нм наблюдается во время обработки отверстия в легированной стали марки 30ХГСА при его среднем значении, равном лишь 4 Нм. При обработке же титанового сплава Вт6 наоборот: наибольшее значение составляет 7,5 Нм при значительном среднем значении, определяющем затрачиваемую на резание мощность, равно 6,15 Нм. Аналогично осевой силе P_x при обработке ПКМ изменяется крутящий момент $M_{кр.}$, он минимален при 2,5 Нм – максимальном значении и 1,2 Нм – среднем.

Таким образом, наибольшую мощность на преодоление сопротивления вращению инструмента и его осевому перемещению нужно затратить во время сверления титанового сплава Вт6. Поэтому для расчета требуемой мощности приводов вращения и подачи выбраны средние значения крутящего момента $M_{кр}$ и осевой силы $P_{x,}$ равные 6,15 Нм и 790 Н соответственно.

Необходимая мощность электрического двигателя для привода вращения проектируемой ЭСМАП определена по формулам[10]:

$$N_э = \frac{M_{кр} \cdot n}{9550 \cdot \eta}, \quad (1)$$

где $N_э$ – эффективная мощность резания, кВт; M – момент силы резания, Нм; n – частота вращения сверла, об/мин; η = 0,9 – КПД электродвигателя.

Таким образом, расчетная мощность для обработки отверстий диаметром 12 мм составляет для электрического привода вращения 0,74 кВт.

Потребная мощность электрического двигателя для привода подач проектируемой ЭСМАП определена через осевое усилие P_x и рассчитана по формуле для винтового механизма[11]:

$$M_{кр} = 0{,}5 \cdot P_x \cdot d \cdot tg\left(\frac{\alpha}{180 \cdot \pi} + \frac{\varphi}{180 \cdot \pi}\right), \quad (2)$$

где $M_{кр}$ – значение крутящего момента, рассчитанного через осевое усилие, Нмм; P_X – осевая сила, Н; d = 16 – средний диаметр резьбы винта, мм; $\alpha = 1{,}8$ – угол подъема

витка резьбы по среднему диаметру, град; $\varphi = 7,2$ – приведенный угол трения, град.

Угол подъема витка резьбы по среднему диаметру и приведенный угол трения приняты из[10].

Подставив значения, произведем расчет:

$$M_{кр} = 0,5 \cdot 790 \cdot 16 \cdot tg\left(\frac{1,8}{180 \cdot \pi} + \frac{7,2}{180 \cdot \pi}\right) = 958 \text{ Нмм} = 0,96 \text{ Нм}.$$

Подставив рассчитанное значение крутящего момента в (1), потребляемая мощность составит $0,12$ кВт.

Таким образом, на основании проведенных расчетов и натурного опыта можно сделать вывод о том, что максимальные силы резания и моменты при обработке смешанного пакета возникали в титановом сплаве марки Вт6.

Расчеты показали, что для привода вращения шпинделя минимальная необходимая мощность должна составлять не менее 0,74 кВт, а для привода подачи – не менее 0,12 кВт.

Анализ подходящих электродвигателей показал, что перспективным типом электрической машины для переносного инструмента является бесколлектроный двигатель постоянного тока BLDC (англ. – Brushless DC electric motor), чаще всего применяемый в беспилотных авиационных системах (БАС) [11]. Исходя из этого, был проведен поиск наиболее энергоемких электродвигателей с наилучшим соотношением удельного показателя мощности на единицу массы (Ватт на килограмм), соответствующих рассчитанным выше характеристикам. В табл. 3 приведены основные характеристики двигателей этой конструкции, выбранные для привода вращения и привода подачи, проектируемой ЭСМАП.

Таким образом, для привода подачи выбран двигатель марки AT2826 KV1100, а для привода вращения – электродвигатель марки U11 II KV120, выпускаемые фирмой T-motor (Китай).

Завышенные по сравнению с расчетными мощностные характеристики обоснованы запасом по крутящему моменту. Модульный принцип проектируемой ЭСМАП позволит при необходимости обрабатывать отверстия больших диаметров, не меняя электрические приводы, заменяя только сменный носовик, подходящий для необходимого диаметра сверла.

Выбранные электрические двигатели, обладающие большей относительно расчетной мощностью, отвечают требованиям к габаритам и общей массы, проектируемой ЭСМАП, но имеют высокую частоту вращения ротора, что создает сложность в регулировании этого параметра до необходимого рабочего диапазона. В конструкции разрабатываемой ЭСМАП дополнительно должны быть установлены редукторные блоки с передаточными отношениями i = 50:1 для привода подачи и i = 5:1 для привода частоты вращения.

Таким образом, применив указанные редукторные блоки, проектируемая ЭСМАП должна иметь следующие характеристики: номинальная частота вращения привода шпинделя составит 1940 об/мин и номинальная частота вращения привода подачи – 90 об/мин. При величине шага ходового винта 1 мм номинальное значение подачи будет 1,5 мм/об. С учетом возможностей регулирования частот вращения (по верхнему пределу в 3 раза больше от номинала и по нижнему пределу до 0) имеем следующие характеристики привода: диапазон частот вращения от 0 до 5820 об/мин, диапазон подач от 0 до 4,5 мм/об. (см. табл. 1).

Таблица 3. Характеристики бесколлекторных двигателей постоянного тока BLDC
Table 3. Characteristics of BLDC brushless DC electric motors

№	Марка электродвигателя	Напряжение, В	Ток номинальный, А	Момент номинальный, Нм	Мощность номинальная, кВт	Мощность максимальная, Нм	Частота вращения, об/мин	Энергоемкость, Вт/кг
1	AT2826 KV1100	48	59	8,6	1,5	2,5	9700	272,7
2	U11 II KV120	48	57,3	10,2	2,8	4	4500	411,8

[10]Кириленко А.Л., Коновалов А.Б., Авакумов М.В. Кинематические расчеты приводов машин: метод. указ. 2-е изд., испр. СПб.: Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2011. 29 с.
[11]Варганов В.О., Аввакумов М.В., Колычев М.В., Гребенникова В.М., Романов В.А. Передача винт-гайка: учеб. пособ. СПб.: Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2015. 57 с.

ДРОБЛЕНИЕ СТРУЖКИ И ПОДАВЛЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ СВЕРЛА

Длина отверстий, образуемых в смешанных пакетах, достигает пяти и более диаметров. Поэтому их можно классифицировать как глубокие, при обработке которых часто возникает проблема удаления стружки. Для обеспечения гарантированного отвода стружки по каналам инструмента и исключения повреждения поверхности отверстия необходимо разделение сливной стружки на отдельные не связанные между собой фрагменты. Заточка стружкодробящих уступов на передней поверхности сверла весьма трудоемка и часто не обеспечивает желаемого результата. Лучше всего для этой цели подходит кинематическое дробление стружки путем наложения осевых или крутильных колебаний на инструмент. Для создания осевых колебаний сверла используют вибраторы разных типов: гидравлические [12], электродинамические [13], шариковые [14], эксцентриковые[12], магнитные [15], автоколебательные вибропатроны [16] и другие механизмы. Однако многие из перечисленных устройств имеют существенные размеры и загромождают зону резания. С целью достижения максимальной компактности конструкции СМАП, необходимой в стесненных условиях сборочного стапеля, осевые колебания инструмента предполагается создавать путем модуляции скорости подачи, реализуемой системой программного управления. В этом случае цепь движения подачи должна включать в себя управляемый системой ЧПУ электродвигатель, редуктор и кинематическую пару гайка – винт.

Осевые колебания сверла создают дополнительную силовую нагрузку на его главные задние поверхности, способствуя ускоренному износу инструмента. Поэтому для снижения динамической нагрузки частота и амплитуда его колебаний должны быть выбраны минимально возможными из условия обеспечения надежного дробления стружки. На рис. 7 приведено взаимное расположение траекторий колебательного движения главных режущих лезвий спирального сверла при разном количестве осевых колебаний, накладываемых на инструмент за один его оборот. Для гарантированного дробления стружки толщина срезаемого слоя должна периодически уменьшаться до нуля. С этой целью амплитуду A осевых колебаний задают равной половине толщины S_r срезаемого слоя или четверти подачи на оборот: $A = S_r/2 = S_o/4$. При четном числе колебаний за оборот (2, 4, 6... и т.д.) вибрационные траектории лезвий синфазны между собой, и толщина срезаемого слоя остается постоянной. Если число колебаний за один оборот принимает нечетное значение (1, 3, 5... и т.д.), то траектории противофазны, и толщина срезаемого слоя пульсирует от нуля до S_0. При этом происходит надежное разделение стружки на отдельные фрагменты. По данным работы [11] для дробления стружки достаточно до 5 осевых колебаний сверла за оборот. Оптимальные значения частоты и амплитуды колебаний могут быть установлены опытным путем для каждого конкретного случая обработки.

Спиральные сверла, используемые для образования отверстий глубиной пять и более диаметров, обладают низкой конструктивной жесткостью в изгибном, крутильном и осевом направлениях, что может провоцировать возбуждение регенеративных автоколебаний при их работе [17]. Автоколебания ускоряют износ инструмента, ухудшают точность и качество обработанной поверхности, и поэтому крайне нежелательны. Для подавления автоколебаний в СМАП может быть использована модуляция скорости резания путем наложения низкочастотных крутильных колебаний на главное движение резания. Этот способ универсален и прост в реализации. Применительно к сверлению эффективность такого подхода доказана экспериментально [18]. В СМАП кинематическая цепь главного движения (подобно движению подачи) должна содержать управляемый системой ЧПУ электродвигатель и редуктор. Кроме подавления автоколебаний, модуляция скорости резания может быть использована и для дробления сливной стружки при сверлении [19, 20].

[12]А.с. № 407660, СССР, B23B 47/04, B23B 5/02. Виброшпиндель / В.С. Мисевич. № 1710833/25-8. Заявл. 01.11.1971; опубл. 10.12.1973. Бюл. № 47.

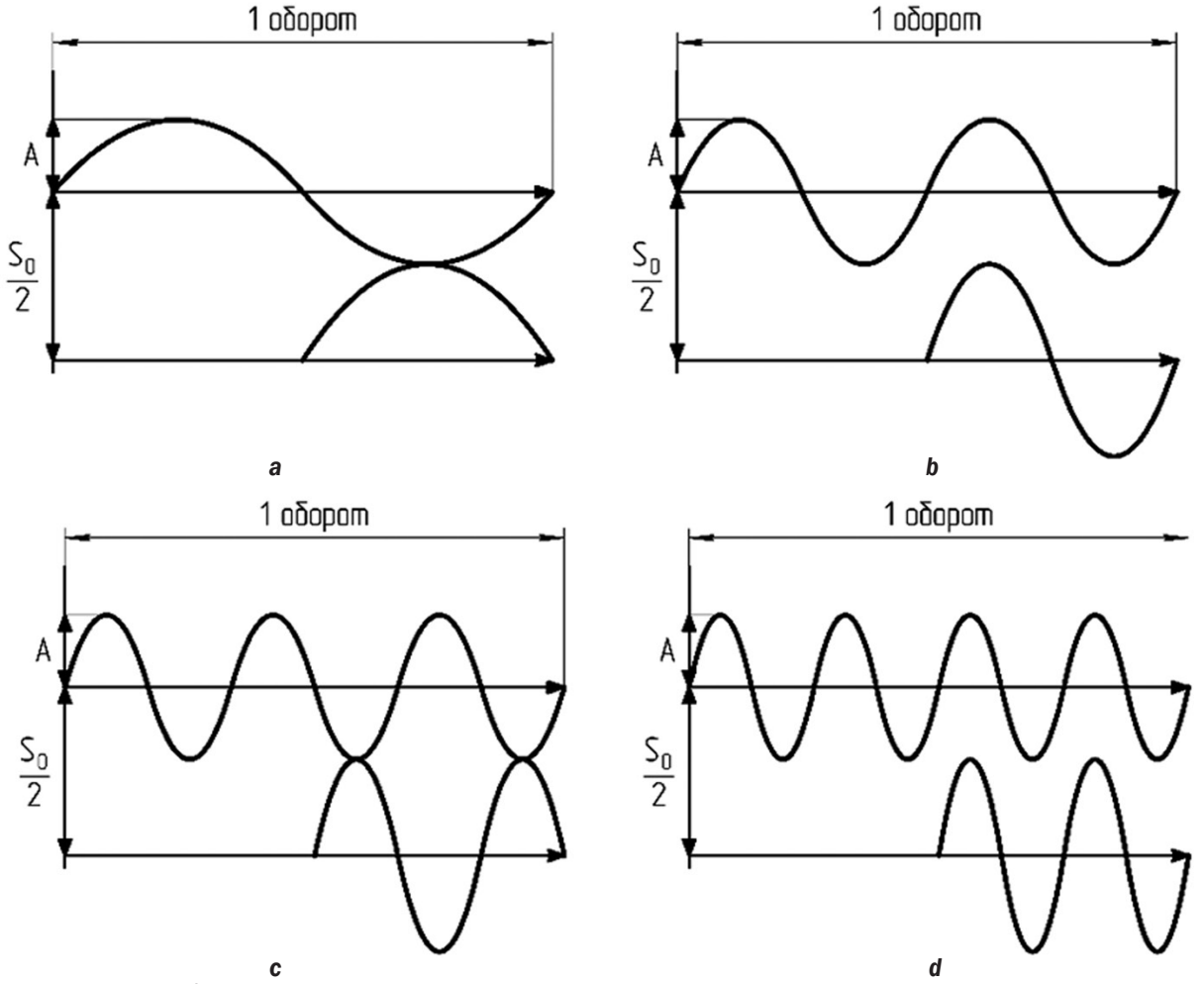


Рис. 7. *Развертки вибрационных следов последовательных проходов лезвий спирального сверла при резании с разным количеством осевых колебаний за один оборот инструмента: a – одно колебание; b – два колебания; c – три колебания; d – четыре колебания*

Fig. 7. *Scans of vibration traces of successive passes of the auger bit blades when cutting with a different number of axial vibrations per tool revolution: a – one oscillation; b – two oscillations; c – three oscillations; d – four oscillations*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом проведенного исследования является предложенный перечень основных рекомендаций к техническому заданию на проектирование сверлильной машины с автоматической подачей. Наиболее предпочтителен для проектирования электрический тип сверлильной машины. ЭСМАП позволяет более эффективно вести обработку смешанных пакетов за счет минимизации затрат на переналадку оборудования и изменение режимов резания для каждого материала в смешанном пакете. Преимущество использования электрической СМАП заключается в возможности реализации программного управления законами движения (частотой вращения и подачи), применения модуляции скорости резания для обеспечения дробления стружки с последующей ее эвакуацией, а также для использования в борьбе с вибрациями, возникающими при недостаточной жесткости системы во время обработки отверстий.

Наиболее предпочтительными диаметрами обработки являются диаметры в диапазоне от 8 до 16 мм. Масса проектируемой ЭСМАП не должна превышать 7 кг. Рекомендуемые габариты сверлильной машины (Длина х Ширина х Высота) должны быть не более 320х110х450 мм. Наиболее рациональна Т – образная компоновка сверлильной машины для работы в стесненных условиях стапельной сборки.

Расчетные и экспериментально полученные данные показывают, что для производительной обработки отверстий диаметром до 12 мм необходимо иметь электрический двигатель частоты вращения мощностью не

менее 1 кВт, а для двигателя подачи – не менее 0,5 кВт.

Выбранные электрические двигатели имеют двукратный запас по мощности, не повышая при этом габаритов и веса конструкции. Такой выбор позволит при необходимости обрабатывать отверстия большего диаметра.

В условиях глобальной конкуренции и внешнеэкономического санкционного давления развитие собственных технологий в авиастроении, включая производственное оборудование, такое как ЭСМАП, является ключом к сохранению и укреплению позиций России на мировом рынке авиационной техники, а также к обеспечению стратегических интересов страны. В дальнейшем планируется изготовление и испытание ЭСМАП при обработке типовых смешанных пакетов, а также изучение эффективности модуляции скорости резания на формирование стружки и подавление вибраций с целью повышения технологичности обработки отверстий.

Список источников

1. Соколова О.Ф., Шарипова Д.Р. Композитные материалы в космической и авиационной промышленности // Проблемы и перспективы экономических отношений предприятий авиационного кластера: сб. науч. тр. VIII Всерос. науч. конф. (г. Ульяновск, 24–26 октября 2023 г.). Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2023. С. 15–18. EDN: AFLZLN.
2. Ширинкин В.В., Макаров В.Ф., Мешкас А.Е. Наукометрическое исследование проблем сверления композиционных материалов // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. 2015. Т. 1. С. 289–298. EDN: VRRBET.
3. Козочкин М.П., Мамотько А.И., Маслов А.Р. Исследование процесса сверления лонжерона лопасти винта из слоистого полимерного композита // Вестник Московского государственного технологического университета «Станкин». 2017. № 4. С. 68–72. EDN: ZUKBML.
4. Завацкая Т.В., Кротенко А.Е., Иванов Ю.Н. Сверление и контроль отверстий в пакетах «титановый сплав-углепластик» // Жизненный цикл конструкционных материалов: сб. тр. XII Всероссийской науч.-техн. конф. (г. Иркутск, 6 июня 2022 г.). Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. С. 209–215. EDN: CVDQBN.
5. Чащин Н.С. Чистовая обработка отверстий в смешанных пакетах // Авиакосмические технологии (АКТ-2018): труды XIX Междунар. науч.-техн. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Воронеж, 18–19 октября 2018 г.). Воронеж: ООО Фирма «Элист», 2018. С. 262–266. EDN: YXXZRJ.
6. Пикалов А.А., Чайников К.К. Применение специальной технологической оснастки и гибких сверлильных шаблонов для сверлильных машин с автоматической подачей режущего инструмента // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 1-2. С. 260–263. EDN: WLWZBD.
7. Свинин В.М., Шутенков А.В., Ястребов С.В. Анализ конструкций и технологических требований к сверлильным машинам с автоматической подачей для авиационного производства // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 16 мая 2023 г.). Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023. С. 38–43.
8. Пашков А.Е., Иванов Ю.Н., Чащин Н.С., Иванова В.О. Оценка эффективности использования твердосплавного и алмазного инструмента для обработки отверстий в смешанных пакетах // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 4. С. 60–66. https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-4-60-66. EDN: ZWZWYV.
9. Стуров А.А. Повышение эффективности обработки отверстий в многослойных пакетах // Молодежный вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 1. С. 7. EDN: VRWXUB.
10. Чащин Н.С., Иванов Ю.Н., Никонович В.В. Сухая чистовая обработка отверстий в смешанных пакетах ступенчатым инструментом // Проблемы механики современных машин: сб. тр. VIII Междунар. конф. (оз. Байкал, 4–9 июля 2022 г.). Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2022. С. 235–242. https://doi.org/10.53980/9785907599055_235. EDN: GYFXXF.
11. Вотинцева А.Б. Критерии выбора двигателя для беспилотного летательного аппарата // Молодой ученый. 2022. № 4. С. 45–47.
12. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. М.: Машиностроение, 1970. 350 с.
13. Пат. № 2412023, Российская Федерация, C2, B23B 35/00, B23B 45/16. Способ вибросверления с мелкодисперсным дроблением стружки / В.Н. Старов, А.В. Масленников, А.И. Барботько. № 2008148738/02. Заявл. 10.12.2008; опубл. 20.02.2011. Бюл. № 5.
14. Пат. № 1294498, СССР, B23B 47/04. Шариковый вибратор / Ю.В. Лебедев, Л.П. Лукьяненко. № 3915500/31-08. Заявл. 18.06.1985; опубл. 07.03.1987. Бюл. № 9.
15. Пат. № 1590213, СССР, B23B 47/04, B23B 25/02. Шпиндельный узел / К.М. Рагульскис, Й.Б. Гудонис, Б.Б. Стульпинас, В.В. Юренас. № 4429368/31-08. Заявл. 24.05.1988; опубл. 07.09.1990. Бюл. № 33.
16. Воронов С.А., Гуськов А.М., Иванов И.И., Барышева Д.В., Киселёв И.А. Существующие методы обеспечения низкочастотных вибраций инструмента с целью дробления стружки при сверлении глубоких отверстий // Наука и образование. 2014. № 12. С. 842–857. https://doi.org/10.7463/1214.0748342. EDN: TEVGVN.

17. Roukema J.C., Altintas Yu. Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation // International Journal of Machine and Tools Manufacture. 2007. Vol. 47. Iss. 9. P. 1455–1473. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.10.005.
18. Svinin V.M., Savilov A.V., Shutenkov A.V. Software spindle speed variation as method for chatter suppression in drilling // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. P. 131–139. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_15.
19. Рызванович А.Я., Генералов В.А., Капралов В.В. Вибрационная обработка с крутильными колебаниями шпинделя // Вестник машиностроения. 2016. № 6. С. 31–35. EDN: WEZRFV.
20. Рызванович А.Я., Генералов В.А. Повышение качества сверления отверстий малого диаметра применением вибрации // Вестник машиностроения. 2022. № 6. С. 78–83. https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-6-78-83. EDN: RIMAEL.

References

1. Sokolova O.F., Sharipova D.R. Composite materials in the space and aviation industries. *Problemy i perspektivy ekonomicheskih otnoshenij predpriyatij aviacionnogo klastera: sbornik nauchnyh trudov VIII Vserossijskoj nauchnoj konferencii = Problems and prospects of economic relations of aviation cluster enterprises: collection of scientific works of the 8th All-Russian scientific conference.* 24–26 October 2023, Ulyanovsk. Ul'yanovsk: Ulyanovsk State Technical University; 2023, p. 15-18. EDN: AFLZLN. (In Russ.).
2. Shirinkin V.V., Makarov V.F., Meshkas A.E. Scientometric study of the problems of drilling composite materials. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovacii*. 2015;1:289-298. (In Russ.). EDN: VRRBET.
3. Kozochkin M.P., Mamotko A.I., Maslov A.R. Study on drilling process of rotor blade spar layered polymer composite. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta "Stankin"*. 2017;4:68-72. (In Russ.). EDN: ZUKBML.
4. Zavatskaya T.V., Krotenko A.E., Ivanov Yu.N. Drilling and monitoring of holes in titanium alloy-carbon plastic packages. In: *Zhiznennyj cikl konstrukcionnyh materialov: sbornik trudov XII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii = Life cycle of structural materials: collected works of the 12th All-Russian Scientific and Technical conference*. 6 June 2022, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2022, p. 209-215. (In Russ.). EDN: CVDQBN.
5. Chashchin N.S. Handling of holes in hubrid stack. In: *Aviakosmicheskie tekhnologii (AKT-2018): trudy XIX Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii i shkoly molodyh uchenyh, aspirantov i studentov = Aerospace technologies (AST-2018): proceedings of the 19th International scientific and technical conference and school for young scientists, postgraduate students and students*. 18–19 October 2018, Voronezh. Voronezh: OOO Firma "Elist"; 2018, p. 262-266. (In Russ.). EDN: YXXZRJ.
6. Pikalov A.A., Chainikov K.K. Special jigs and drilling templates for automated drilling units. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016;18(1-2):260-263. (In Russ.). EDN: WLWZBD.
7. Svinin V.M., Shutenkov A.V., Yastrebov S.V. Analysis of designs and technological requirements for drilling machines with automatic feed for aircraft production. In: *Zhiznennyj cikl konstrukcionnyh materialov (ot polucheniya do utilizacii): materialy XIII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Life cycle of structural materials (from production to disposal): materials of the 13th All-Russian scientific and technical conference with international participation*. 16 May 2023, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2023, p. 38-43. (In Russ.).
8. Pashkov A.E., Ivanov Yu.N., Chashin N.S., Ivanova V.O. Efficiency evaluation of the use of carbide and diamond tool for processing holes in mixed packages. *Systems. Methods. Technologies.* 2017;4:60-66. (In Russ.). https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-4-60-66. EDN: ZWZWYV.
9. Sturov A.A. Effectiveness increase of hole-making operation in multilayer stacks. *Molodezhnyj vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2016;1:7. (In Russ.). EDN: VRWXUB.
10. Chashchin N.S., Ivanov Yu.N., Nikonovich V.V. Dry finishing of holes in mixed stack with step tools. In: *problemy mekhaniki sovremennyh mashin: sbornik trudov VIII Mezhdunarodnoj konferencii = Problems of modern machine mechanics: collected articles of the 8th International conference*. 4–9 July 2022, Bajkal. Ulan-Ude: East Siberian State University of Technology and Management; 2022:235-242. (In Russ.). https://doi.org/10.53980/9785907599055_235. EDN: GYFXXF.
11. Votintseva A.B. Engine selection criteria for an unmanned aerial vehicle. *Molodoj uchenyj*. 2022;4:45-47. (In Russ.).
12. Poduraev V.N. *Vibration cutting*. M.: Mashinostroenie; 1970, 350 p. (In Russ.).
13. Starov V.N., Maslennikov A.V., Barbot'ko A.I. *Method of vibration drilling with fine crushing of chips*. Patent RF, no. 2412023; 2011. (In Russ.).
14. Lebedev Yu.V., Lukyanenko L.P. *Ball vibrator*. Patent SSSR, no. 1294498; 1987. (In Russ.).
15. Ragul'skis K.M., Gudonis J.B., Stul'pinas B.B., Yurenas V.V. *Spindle unit*. Patent SSSR, no. 1590213; 1990. (In Russ.).
16. Voronov S.A., Gus'kov A.M., Ivanov I.I., Barysheva D.V., Kiselyov I.A. Existing methods providing low-frequency tool vibrations for chips crushing under deep hole drilling. *Nauka i obrazovanie.* 2014;12:842-857. (In Russ.). https://doi.org/10.7463/1214.0748342. EDN: TEVGVN.

17. Roukema J.C., Altintas Yu. Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation. *International Journal of Machine and Tools Manufacture*. 2007;47(9):1455-1473. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.10.005.
18. Svinin V.M., Savilov A.V., Shutenkov A.V. Software spindle speed variation as method for chatter sup-pression in drilling. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020;131-139. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_15.
19. Ryzvanovich A.Ya., Generalov V.A., Kapralov V.V. Vibration processing with spindle torsional vibrations. *Vestnik mashinostroeniya*. 2016;6:31-35. (In Russ.). EDN: WEZRFV.
20. Ryzvanovich A.Ya., Generalov V.A. Improving the quality of drilling holes of small diameter using vibration. *Vestnik mashinostroeniya*. 2022;6:78-83. (In Russ.). https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-6-78-83. EDN: RIMAEL.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Свинин Валерий Михайлович,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры «Технология и оборудования машиностроительных производств»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ svinin_vm@mail.ru

Шутенков Антон Владимирович,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
shutenkov@ex.istu.edu

Пономарев Борис Борисович,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры «Технология и оборудования машиностроительных производств»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
pusw@istu.edu

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valery M. Svinin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Industries,
Irkutsk National Research Technical University
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ svinin_vm@mail.ru

Anton V. Shutenkov,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
shutenkov@ex.istu.edu

Boris B. Ponomarev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Industries,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
pusw@istu.edu

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 28.05.2024 г.; принята к публикации 30.05. 2024 г.

Information about the article

The article was submitted 20.04.2024; approved after reviewing 28.05.2024; accepted for publication 30.05. 2024.

iPolytech Journal 2024. Т. 28. № 2. С. 238-246 ISSN 2782-4004 (print)
2024;28(2):238-246 ISSN 2782-6341 (online)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья
УДК 378.096:621.91.01:372.862
EDN: NWEOCR
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-238-246

Некоторые аспекты контроля процесса фотополимеризации в аддитивных технологиях

Н.Г. Филиппенко[1]✉, С.К. Каргапольцев[2], Т.Т. Чумбадзе[3]

[1,3]Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия
[2]Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Основная цель данного исследования заключалась в разработке технологического подхода организации автоматизированного контроля процесса производства изделий из фотополимеров. Для идентификации начала и окончания технологического процесса полной полимеризации изучаемых изделий был предложен и применялся термометрический анализ с использованием разработанного авторами автоматизированного лабораторного стенда на базе промышленной установки аддитивной полимеризации AZ3000. Для разработки алгоритма работы был использован принцип экстремального управления. Изготовление образцов размерами 25х25х3 мм производилось с применением широко используемого материла фотополимерной композиции марки ROEHM R-50. Авторами были научно обоснованы контролируемые параметры процесса фотополимеризации, а именно: температура в активной зоне и на поверхности изделия. Разработанный авторами алгоритм, реализованный в виде программного комплекса, написанного для процессора AtMega 328 на языке программирования С++ в среде AVR Studio, позволил уверенно контролировать начало и окончание процесса полной полимеризации изделия. Были изучены прочностные характеристики образцов из фотополимерных материалов. Установлено, что твердость образцов из фотополимерных материалов увеличилась с 109,12 до 117,5HL. Это позволило доказать функционирование разработанного алгоритма системы управления процессом фотополимеризации. Апробация разработанного технологического подхода и алгоритма автоматизированного контроля процесса производства изделий из фотополимеров с использованием аддитивных технологий позволяет сделать вывод о расширении возможностей получения деталей с определенными заранее прочностными характеристиками. Использование таких деталей открывает новый потенциал выбора фотополимерных материалов для изготовления изделий в различных отраслях машиностроения, включая транспорт и авиацию.

Ключевые слова: аддитивные технологии, фотополимеры, контрольные операции, автоматизация

Для цитирования: Филиппенко Н.Г., Каргапольцев С.К., Чумбадзе И.Т. Некоторые аспекты контроля процесса фотополимеризации в аддитивных технологиях // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 238–246. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-238-246. EDN: NWEOCR.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

A few aspects of controlling the photopolymerisation process in additive manufacturing

Nikolay G. Filippenko[1]✉, Sergey K. Kargapoltsev[2], Tamara T. Chumbadze[3]

[1,3]Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia
[2]Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. This study is aimed at developing a technological approach for managing the automated control of the production process of photopolymer-based products. Thermometric analysis was proposed and used to identify the onset and completion of the polymerisation process of the studied products using a home-built automated laboratory setup based on the industrial additive polymerisation unit AZ3000. The principle of extremal control was used to develop the operation algorithm. Samples measuring 25x25x3 mm were manufactured from the extensively used photopolymer composite ROEHM R-50. The controlled parameters of the photopolymerization process, including the temperature in the active zone and on the product surface, were scientifically justified. The developed algorithm, implemented as a software package written for the

© Филиппенко Н.Г., Каргапольцев С.К., Чумбадзе И.Т., 2024

AtMega 328 processor in C++ within the AVR Studio environment, offers precise control over the onset and completion of the polymerisation process within the product. The structural characteristics of the test photopolymer materials were studied. It was found that the hardness of the photopolymer samples increased from 109.12 to 117.5 HL. This demonstrated the functionality of the developed algorithm for the control system of the photopolymerisation process. The testing of the developed technological approach and algorithm for automated control of additive manufacturing using photopolymer materials indicates that it is possible to obtain components with predetermined strength characteristics. The use of such components adds a new dimension to the selection of photopolymer materials for the manufacture of products in various fields of mechanical engineering, including transport and aviation.

Keywords: additive technologies, photopolymers, check-out operations, automation

***For citation*:** Filippenko N.G., Kargapoltsev S.K., Chumbadze T.T. A few aspects of controlling the photopolymerisation process in additive manufacturing. *iPolytech Journal.* 2024;28(2):238-246. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-238-246. EDN: NWEOCR.

ВВЕДЕНИЕ

На рубеже XX – начале XXI в. революционное распространение получили технологии аддитивного производства [1]. Они активно используются при выпуске изделий не только в машиностроении, но и нашли применение в трансплантологии, стоматологии и других областях медицины [2, 3]. Среди наиболее популярных методов производства изделий выделяются проекторная DLP (от англ. Digital Light Processing), лазерная SLA (от англ. Stereolithography) и стереолитографическая технологии.

Из проведенного исследования компанией Sculpteo в 2021 г. следует, что примерно 70% производственных компаний стремятся интегрировать технологии 3D-печати в ремонтные, сборочные и выпускаемые производства. Также было отмечено, что около 50% промышленных предприятий отказываются от вспомогательных производств и эти функции делегируют сторонним организациям (аутсоринг), специализирующихся на аддитивных технологических производствах. Причем основная цель такой организации производства – сосредоточение на основной деятельности компании. Опрос показывает, что особенно этому подвержены машиностроительные предприятия с активным стремлением к узконаправленному ассортименту выпускаемой продукции. Таким образом, появились предпосылки выхода на рынок производств, выпускающих единичные и мелкосерийные изделия большого наименования. Технологическая подготовка предприятий такого вида на современном этапе ориентируется на оборудование нового типа для 3D-печати, выгодно отличающегося от классически-универсальных металлообрабатывающих станков. Существует несколько типов аддитивного оборудования, в зависимости от технологий получения 3D-изделий.

При этом необходимо отметить, что процент брака изделий, изготовленных по аддитивным технологиям, превышает количество бракованных деталей, выполненных с применением устоявшихся технологических процессов, и может доходить до 12%.

Опрос показал, что наиболее применяемыми методами получения изделий с использованием аддитивных технологических процессов являются следующие, %: полимеризация смолы стереолитографией – 19; лазерное спекание порошка полимера – 18; выборочные расплавления и сплавления металлических частиц – 16; впрыск связующего вещества – 14; электронно-лучевая плавка металла – 12.

Несложно определить, что наиболее востребованным методом аддитивной технологии является стереолитография (рис. 1), технология которой и была взята в качестве основной для определения причин низкого качества выпускаемой продукции.

На основании проведенных исследований [4, 5], авторы которых подробно рассматривали различные методы аддитивного производства в современном производстве, было установлено, что развитие этих технологий рентабельно только при производстве единичных изделий и опытных образцов.

Причина текущего положения дел заключается в том, что использование аддитивного производства сталкивается с проблемой низкого качества изделий [6, 7], что обусловлено отсутствием объективного контроля процесса аддитивной полимеризации. В связи с этим цель данного исследования состояла в разработке системы контроля и управления технологическим процессом аддитивной фотополимеризации.

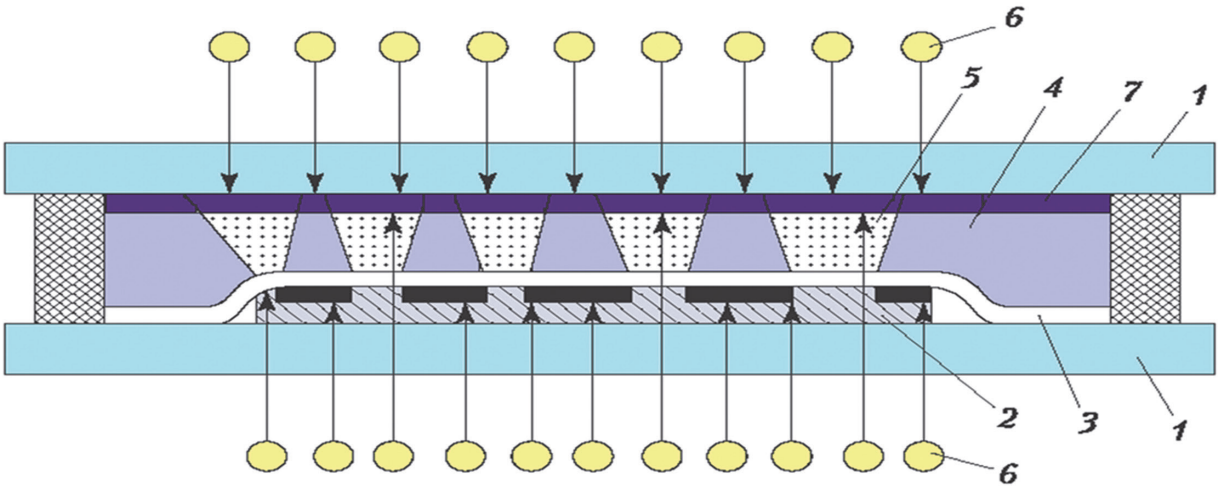


Рис. 1. *Стереолитографический метод аддитивной технологии: 1 – стекло нижнее; 2 – негатив; 3 – защитная пленка; 4 – фотополимер; 5 – отвержденная композиция; 6 – ультрафиолетовые (УФ) лампы засветки; 7 – основа полимеризуемой детали*
Fig. 1. *Stereolithographic method of additive technology: 1 – bottom glass; 2 – negative; 3 – protective film; 4 – photopolymer; 5 – cured composition; 6 – ultraviolet lamps; 7 – polymerized part base*

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первоначальной задачей было определение управляемых и контролируемых параметров технологического процесса фотополимеризации.

Беря за основу принцип построения систем автоматизированного управления технологическими процессами и его оборудованием, мы придерживались правила интеграции разрабатываемых систем контроля и управления в существующие системы. Анализ штатно установленных систем управления показал, что в качестве управляемых параметров выступает наряду с другими и время экспозиции ($\tau_{эксп}$). Необходимо отметить, что контроль времени экспозиции стандартно используется во всех моделях аддитивного оборудования.

Хотелось бы отметить, что работе по определению контролируемых параметров технологического процесса предшествовало исследование физики процесса фотополимеризации [4, 5].

Было определено, что процесс фотополимеризации включает в себя следующие комплексные реакции:

– инициирование активного центра с высокой энергией активации (рис. 2);

– последовательный рост цепи с присоединением мономеров к активному центру с низкой энергией активации. Важно отметить, что эта реакция идет с выделением тепла (экзотермическая реакция) и происходит с высокой скоростью (рис. 3);

– разрушение активного центра и обрыв цепи (рис. 4) [8–13].

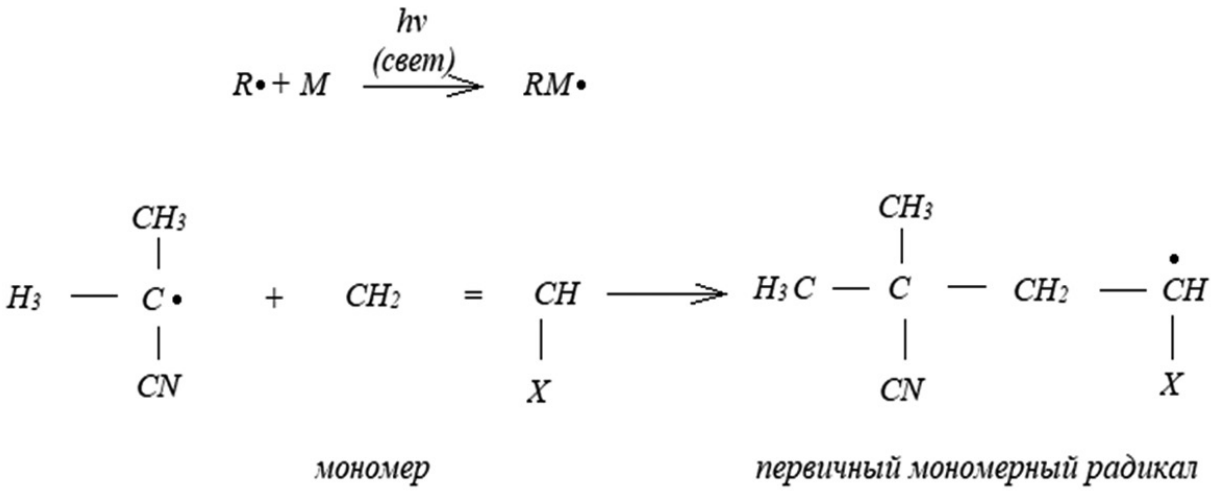


Рис. 2. *Инициирование активного центра с высокой энергией активации*
Fig. 2. *Initiation of an active center with the high activation energy*

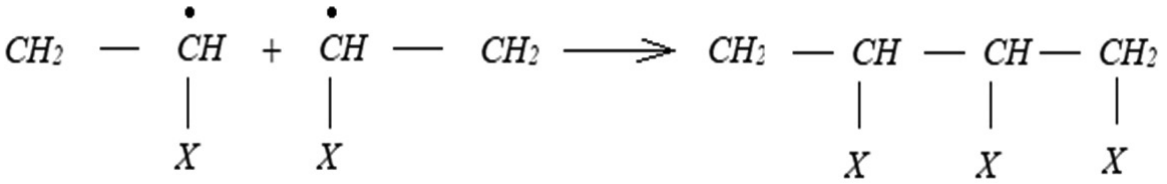


Рис. 3. *Последовательный рост цепи*
Fig. 3. *Sequential chain growth*

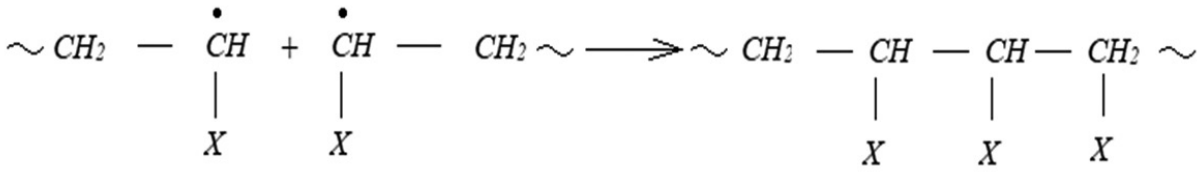


Рис. 4. *Обрыв цепи после разрушения активных центров*
Fig. 4. *Chain breaking after active center destruction*

Физика процесса фотополимеризации композитов была проанализирована и, в соответствии с аналогичными выводами, полученными авторами в работах [14–16], было определено, что рост макромолекул после инициирования реакции полимеризации УФ-излучением сопровождается выделением тепловой энергии T_{max} (экзотермическая реакция). Также отмечается, что прекращение роста и разрыв цепи происходит с поглощением тепла T_{min} (эндотермическая реакция). Определенные выше свойства процесса фотополимеризации позволили выдвинуть гипотезу о возможности организации контроля технологии его получения, основанного на термометрическом методе. Учитывая, что определение абсолютных значений T_{max} и T_{min} не являлось задачей настоящего исследования, т.к. эти показатели зависят от многих факторов, было принято решение организовать контроль процесса по принципу экстремального управления с регистрацией средней температуры технологической системы ($T_{полим}$).

Идентификация стадий (инициация, рост, затухание) технологического процесса фотополимеризации композитов с целью контроля качества продукции может быть организована в режиме реального времени по динамике изменения температуры композита, т.е. по определению экстремумов $T_{полим}/dt$ [17, 18].

Таким образом, найденное обоснование контролируемых параметров технологического процесса фотополимеризации в УФ-излучающей экспонирующей камере (технологической системе) позволило разработать алгоритм контроля аддитивного изготовления 3D-деталей (рис. 5).

Отличительной особенностью данного алгоритма является его универсальность, т.к. он был построен по адаптивной системе управления (АСУ). Заданными параметрами являются только граничные значения времени и температуры ($\tau_{эксп}$, $\tau_{задержки}$, T_{max}), а непрерывный контроль осуществлялся, как уже было сказано ранее, по динамике температуры полимера в технологической системе $T_{полим}/dt$.

Необходимо отметить, что перед активацией АСУ (см. рис. 5) технологическим процессом происходит загрузка технического оборудования оператором. В работе это не описывается, поскольку процесс зависит от конкретного типа изделия и оборудования, а предлагаемый алгоритм контроля и управления носит универсальный характер.

Исходные данные по температуре $T_{макс}$ и времени экспозиции $\tau_{эксп}$ фотополимеров определялись исходя из данных, предоставляемых производителем (паспортные данные). Также их значения определялись на основании экспериментальных данных, полученных авторами и другими исследователями [19].

Предусмотренные алгоритмом контрольные операции, процесс аддитивной фотополимеризации выполнены по многозадачной схеме, когда наряду с контролем допустимой температуры нагрева полимера T_{max} и заданного времени экспонирования $\tau_{эксп}$ определяется экстремум $T_{полим\ (n)}(т) - T_{полим(n-1)}(т) < 0$, который и является основным показателем окончания процесса полимеризации.

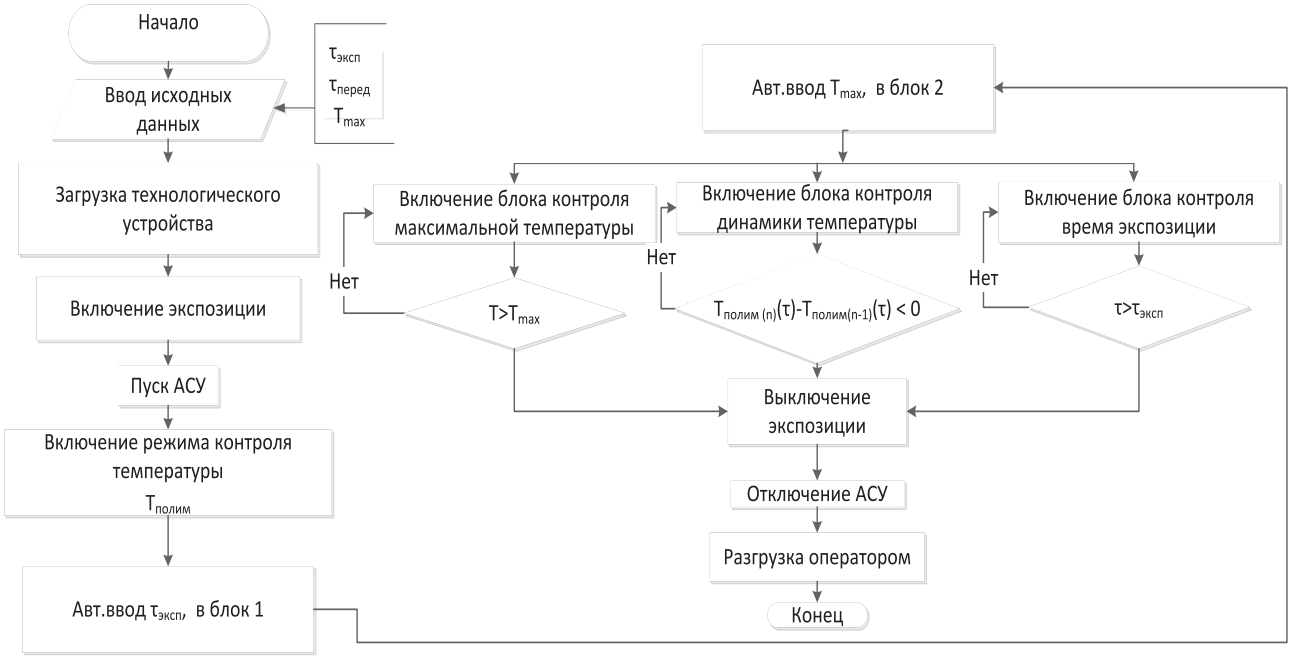


Рис. 5. *Алгоритм контроля аддитивного изготовления 3D-деталей*
Fig. 5*. Control algorithm for additive manufacturing of 3D parts*

Как было сказано ранее, полимерные материалы подвержены воздействию различных факторов, изменяющих их физико-химические свойства. Таким образом, температурные изменения, происходящие в фотополимерных материалах в процессе их инициализации и деградации, происходят с различными непостоянными показателями, в том числе и для одинаковых марок материала.

Поэтому экспериментальные исследования проводились с материалом марки ROEHM, взятого из одной партии, одного времени выпуска фотополимера. Натурные испытания осуществлялись на промышленном оборудовании модели AZ3000. Количество образцов варьировалось от 5 до 7 шт. в серии. Форма образцов была выбрана квадратной со стороной 25 мм. Толщина образцов составляла 3 мм и определялась двумя специальными вставками между основным и покрывным стеклом (рис. 6 *a, в, с*).

Время экспонирования определялось в соответствии с рекомендациями, указанными в паспорте на ROEHM и составляло от 26 до 30 с.

a ***b*** ***c***

Рис. 6. *Промышленная установка модели AZ3000 (a); фотополимерный материал ROEHM (b); полученный прямоугольный образец 25x25x3 мм (c)*
Fig. 6. *Industrial installation of the AZ3000 model (a); ROEHM photopolymer material (b); resulting rectangular sample with the size range of 25x25x3 mm (c)*

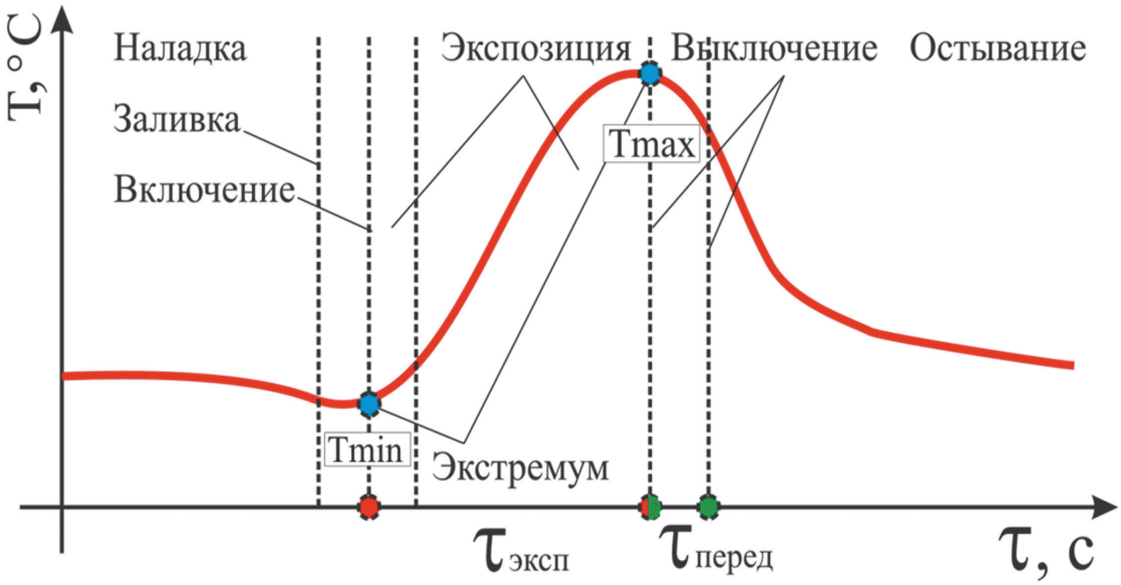


Рис. 7. *Результаты изменения температуры образца в процессе фотополимеризации*
Fig. 7. *Results of sample temperature variation under photopolymerization*

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты изменения температуры образца в процессе фотополимеризации показаны на рис. 7.

Анализ данных показывает, что в момент наладки и заливки фотополимера в форму (крайний левый период процесса) фиксируется минимальная температура T_{min}, что идентифицируется системой контроля технологического процесса как первый экстремум, или начальный этап работы. Далее, включается операция засветки и контролируется заданное время экспонирования $\tau_{эксп}$. При этом система контроля идентифицирует окончание полимеризации по второму экстремуму температуры, по максимальному его значению T_{max}. Ввиду низкого коэффициента теплопроводности полимеров получаемый показатель второго экстремума температуры не всегда идентифицирует окончание технологического процесса образования готового изделия, поэтому алгоритм предусматривает организацию процесса передержки, время которого $\tau_{перед}$ определяется заранее на основе опыта оператора или экспериментов. Так, для фотополимера марки ROEHM и прямоугольных образцов оно составило $T_{перед} = 4$ с.

Критерием показателя качества получения образцов из фотополимера был выбран один из показателей его механических свойств – твердость. Эксперименты показали, что твердость, полученная без контроля, определяемого алгоритмом, составила 109,12 HL. Образец был изготовлен только при контроле регулируемого времени фотополимеризации (экспозиции), как это предусмотрено существующими технологиями аддитивного оборудования (рис. 8, нижний график 3). Дальнейшее увеличение времени облучения (не показано на графике) привело к охрупчиванию и деструкции материала.

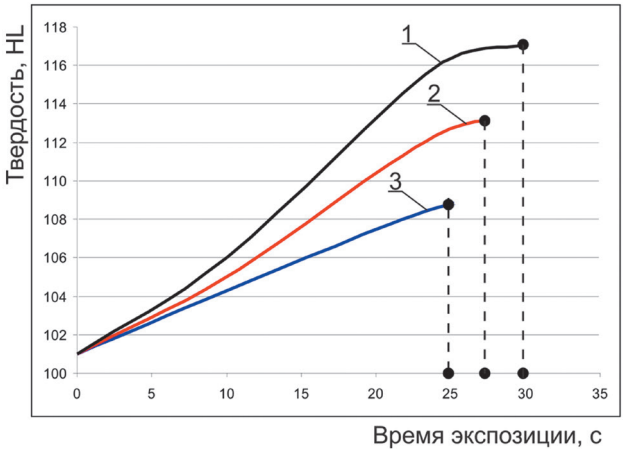


Рис. 8. *Твердость изделий из фотополимеров*
Fig. 8. *Hardness of photopolymer products*

Окончание процесса экспонирования фотополимера при достижении значения температуры (экстремум температуры), равной первому максимуму, увеличил твердость изделий до 113,29 HL (рис. 8, график 2). Проведенный технологический процесс с

контролем процесса фотополимеризации и его окончанием после дополнительного облучения (переэкспонирование) позволил увеличить твердость образца до 117,05 HL (рис. 9, график 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследование возможности контроля и управления технологическим процессом аддитивной фотополимеризации по экстремальным температурам технологической системы позволили:

– доказать правильность выбора температуры как показателя контроля технологического процесса аддитивной фотополимеризации;

– разработать алгоритм контроля и управления технологическим процессом полимеризации фотокомпозиционных полимерных материалов;

– определить дополнительные возможности использования аддитивных технологий для изготовления деталей с улучшенными механическими свойствами изделия.

Список источников

1. Vyavahare S., Teraiya S., Panghal D., Kumar S. Fused deposition modelling: a review // Rapid Prototyping Journal. 2020. Vol. 26. Iss. 1. P. 176–201. https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2019-0106.
2. Камаев С.В., Марков М.А., Никитин А.Н., Новиков М.М. Лазерная стереолитография: состояние и перспективы // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: сб. докл. Междунар. науч. конф. (г. Москва, 27 мая 2015 г.). М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2015. № 4. С. 44–48. EDN: UVKKPD.
3. Lipson H., Kurman M. Fabricated: the new world of 3D printing. John Wiley & Sons Limited, 2013. 320 p.
4. Финогеев Д.Ю., Решетникова О.П. Аддитивные технологии в современном производстве деталей точного машиностроения // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 3. С. 63–71. EDN: QHXXJP.
5. Эртесян А.Р. Обзор технологий 3D-печати в стоматологии // Медико-фармацевтический журнал «Пульс». 2020. № 3. С. 15–18. https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-10-15-18. EDN: NGOLGM.
6. Essid O., Laga H., Samir C. Automatic detection and classification of manufacturing defects in metal boxes using deep neural networks // PLoS ONE. 2018. Vol. 13. Iss. 11. P. e0203192. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203192.
7. Strokina N., Mankki A., Eerola T., Lensu L., Käyhkö J., Kälviäinen H. Framework for developing image-based dirt particle classifiers for dry pulp sheets // Machine Vision and Applications. 2013. Vol. 24. Iss. 4. P. 869–881. https://doi.org/10.1007/s00138-013-0485-1.
8. Раевский Е.В., Цыганкова А.Л. Технология лазерного спекания металла вышла на новый уровень промышленного применения // Аддитивные технологии. 2016. № 1. С. 13–15.
9. Тагер А.А. Физико-химия полимеров / под ред. А.А. Аскадского. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Научный мир, 2007. 573 с.
10. Рихарев М.И. Цифровая аддитивная линейка // Аддитивные технологии. 2020. № 3. С. 18–26.
11. Абакумов Г.А., Менсов С.Н. Семенов А.В., Чесноков С.А. Особенности возникновения и развития надмолекулярной структуры в полимерах при фотополимеризации // Высокомолекулярные соединения. Сер. Б. 2000. Т. 42. № 7. С. 1252–1256.
12. Шурыгина М.П., Чесноков С.А., Лопатин М.А., Черкасов В.К., Абакумов Г.А. Кинетика фотовосстановления 9,10 фенантренхинона в присутствии аминов и полиметилбензолов // Известия Академии наук. Серия химическая. 2004. Т. 53. № 11. С. 2381–2385.
13. Crivello J.V., Reichmanis E. Photopolymer materials and processes for advanced technologies // Chemistry of Materials. 2014. Vol. 26. Iss. 1. P. 533–548. https://doi.org/10.1021/cm402262g.
14. Odian G. Principles of polymerization. New York: John Wiley & Sons, 2004. Ch. 3. 788 p.
15. Юдина Н.А., Манюк О.Н. Актуальные вопросы фотополимеризации и прямого композитного восстановления твердых тканей зубов // Медицинские новости. 2022. № 9. С. 54–58. EDN: UOTWSI.
16. Биллингхэм Р.Н., Ледвис А., Теддер Дж. Реакционная способность, механизмы реакций и структура в химии полимеров / пер. с англ. М.: Мир, 1977. 79 с.
17. Думчев И.С., Ларченко А.Г., Попов С.И., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В. Восстановление полиамидных сепараторов подшипников буксового узла подвижного состава ОАО РЖД // Молодой ученый. 2012. № 12. С. 48–51. EDN: RFYKFD.
18. Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г., Ларченко А.Г., Филатова С.Н. Высокочастотная электротермическая обработка неметаллического вторичного сырья // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 6. С. 55–65. https://doi.org/10.7463/0614.0712029. EDN: STAQZL.
19. Delli U., Chang Shing. Automated process monitoring in 3D printing using supervised machine learning // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 26. P. 865–870. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.111.
20. Бычковский Д.Н., Неткачев А.Г. Производство литейных форм методом послойной печати // Аддитивные технологии. 2018. № 4. С. 16–20.

References

1. Vyavahare S., Teraiya S., Panghal D., Kumar S. Fused deposition modelling: a review. *Rapid Prototyping Journal.* 2020;26(1):176-201. https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2019-0106.

2. Kamaev S.V., Markov M.A., Nikitin A.N., Novikov M.M. Laser stereolithography: state and prospects. In: *Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee: sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii = Additive technologies: present and future: collected reports of the International scientific conference*. 27 May 2015, Moscow. Moscow: The national research center "Kurchatov institute"; 2015, Iss. 4, p. 44-48. (In Russ.). EDN: UVKKPD.
3. Lipson H., Kurman M. *Fabricated: the new world of 3D printing*. John Wiley & Sons Limited; 2013, 320 p.
4. Finogeev D.Yu., Reshetnikova O.P. Additive technologies in modern production of precision machine building parts. *Vestnik of Saratov State Technical University*. 2020;3:63-71. (In Russ.). EDN: QHXXJP.
5. Ertesyan A.R. Overview of 3D Printing technologies in dentistry. *Medico-pharmaceutical journal "PULSE".* 2020;3:15-18. (In Russ.). https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-10-15-18. EDN: NGOLGM.
6. Essid O., Laga H., Samir C. Automatic detection and classification of manufacturing defects in metal boxes using deep neural networks. *PLoS ONE*. 2018;13(11):e0203192. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203192.
7. Strokina N., Mankki A., Eerola T., Lensu L., Käyhkö J., Kälviäinen H. Framework for developing image-based dirt particle classifiers for dry pulp sheets. *Machine Vision and Applications*. 2013;24(4):869-881. https://doi.org/10.1007/s00138-013-0485-1.
8. Raevskij E.V., Cygankova A.L. The technology of metal laser sintering has moved to a new level of industrial application. *Additive technologies*. 2016;1:13-15. (In Russ.).
9. Tager A.A. *Physical chemistry of polymers*. Moscow: Nauchnyj mir; 2007, 573 p. (In Russ.).
10. Rikharev M.I. Digital additive ruler. *Additive technologies*. 2020;3:18-26. (In Russ.).
11. Abakumov G.A., Mensov S.N. Semenov A.B., Chesnokov S.A. Development of evolution of supramolecular structure in polymers under photopolymerization. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*. *Ser. B*. 2000;42(7):1252-1256. (In Russ.).
12. Shurygina M.P., Chesnokov S.A., Lopatin M.A., Cherkasov V.K., Abakumov G.A. Kinetics of photoreduction of 9,10 phenanthrenequinone in the presence of amines and polymethylbenzenes. *Russian Chemical Bulletin*. 2004;53(11):2381-2385. (In Russ.).
13. Crivello J.V., Reichmanis E. Photopolymer materials and processes for advanced technologies. *Chemistry of Materials.* 2014;26(1):533-548. https://doi.org/10.1021/cm402262g.
14. Odian G. *Principles of polymerization*. New York: John Wiley & Sons; 2004, Ch. 3, 788 p.
15. Yudina N.A., Manyuk O.N. Actual problems of light curing and direct composite restoration of the teeth. *Medicinskie novosti*. 2022;9:54-58. (In Russ.). EDN: UOTWSI.
16. Billingham R.N., Ledvis A., Tedder G. *Reactivity, mechanism and structure in polymer chemistry*, 1977, 79 p. (Russ. ed.: *Reakcionnaya sposobnost', mekhanizmy reakcij i struktura v himii polimerov*. Moscow: Mir; 1977, 79 p.)
17. Dumchev I.S., Larchenko A.G., Popov S.I., Filippenko N.G., Livshic A V. Restoration of polyamide bearing cages for the axle box unit of the rolling stock of JSC Russian Railways. *Molodoj uchenyj.* 2012;12:48-51. (In Russ.). EDN: RFYKFD.
18. Livshitz A.V., Filippenko N.G., Larchenko A.G., Filatova S.N. High-frequency electro-thermal processing of secondary nonmetallic raw materials. *The Education and Science Journal*. 2014;6:55-65. https://doi.org/10.7463/0614.0712029. EDN: STAQZL. (In Russ.).
19. Delli U., Chang Shing. Automated process monitoring in 3D printing using supervised machine learning. *Procedia Manufacturing*. 2018;26:865-870. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.111.
20. Bychkovskij D.N., Netkachev A.G. Production of molds by layer-by-layer printing. *Additive technologies*. 2018;4:16-20. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Филиппенко Николай Григорьевич,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов»,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
✉ ifpi@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-7557-7774

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay G. Filippenko,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Production Process Automation,
Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia
✉ ifpi@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-7557-7774

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

Чумбадзе Тамара Темуриевна,
аспирант,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
ifpi@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-1160-5756

Tamara T. Chumbadze,
Postgraduate Student,
Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia
ifpi@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-1160-5756

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 08.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 03.05.2024 г.; принята к публикации 12.05.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 08.04.2024; approved after reviewing 03.05.2024; accepted for publication 12.05.2024.

iPolytech Journal 2024. Т. 28. № 2. 247-260 ISSN 2782-4004 (print)
2024;28(2):247-260 ISSN 2782-6341 (online)

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья
УДК 621.311
EDN: XKQPGA
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-247-260

Исследование влияния несбалансированности нагрузок сети низкого напряжения на потокораспределение в сети среднего напряжения

О.Н. Войтов[1]✉, И.И. Голуб[2], Л.В. Семенова[3], Е.В. Карпова[4], А.Л. Бучинский[5]

[1-4]Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия
[5]ОГУЭП «Облкоммунэнерго», Иркутск, Россия

Резюме. Цель исследований заключалась в решении проблемы повышения точности расчета потокораспределения в распределительной сети среднего напряжения на основе измерений балансовых интеллектуальных счетчиков, размещенных на вторичной стороне трансформаторов 6(10)/0,4 кВ. Для учета влияния несбалансированности нагрузок в сети низкого напряжения на потокораспределение в сети среднего напряжения использовалось приведение трехфазных трехпроводных линий к однолинейному представлению, которое позволяет применять для расчета несимметричного режима программы расчета симметричных режимов. Определение нагрузок сети среднего напряжения осуществлялось добавлением к нагрузкам, измеренным на вторичной стороне трансформаторов, потерь мощности в обмотках и в сердечнике трансформатора. Расчет потерь мощности в обмотках с использованием методов фазных координат и симметричных составляющих включает определение токов в обмотках каждой фазы по 48 срезам измерений мощностей нагрузок и модулей напряжений, выполненных балансовым счетчиком в течение суток. Показано, что корректность выражений для расчета потерь мощности в обмотках трансформаторов подтверждается равенством суммарных потерь в фазных координатах и симметричных составляющих. Установлено, что потери мощности обратной последовательности в обмотках трансформаторов близки к нулю, а потери нулевой последовательности существенно меньше потерь прямой последовательности практически для всех трансформаторов со схемой соединения обмоток звезда/звезда с нулем, независимо от коэффициента загрузки и номинальной мощности. Таким образом, в результате проведенных исследований были доказаны возможность и эффективность использования измерений балансовых счетчиков для определения нагрузок и расчета потокораспределения сети среднего напряжения, что проиллюстрировано для реальной распределительной сети, включающей 26 трансформаторов. Проведенные исследования показали необходимость уточнения математических моделей трансформаторов при совместном расчете распределительных сетей среднего и низкого напряжений.

Ключевые слова: распределительная сеть, интеллектуальные балансные счетчики, несбалансированность нагрузок, потокораспределение, фазные координаты, симметричные составляющие

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0001) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг.

Для цитирования: Войтов О.Н., Голуб И.И., Семенова Л.В., Карпова Е.В., Бучинский А.Л. Исследование влияния несбалансированности нагрузок сети низкого напряжения на потокораспределение в сети среднего напряжения // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 247–260. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-247-260. EDN: XKQPGA.

POWER ENGINEERING

Original article

Effects of unbalanced loads in a low-voltage network on flow distribution in a medium-voltage network

Oleg N. Voitov[1]✉, Irina I. Golub[2], Luydmila V. Semenova[3], Elena V. Karpova[4], Anatoly L. Buchinsky[5]

[1-4]Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia
[5]Regional State Unitary Energy Enterprise «Oblkommunenergo», Irkutsk, Russiaa

© Войтов О.Н., Голуб И.И., Семенова Л.В., Карпова Е.В., Бучинский А.Л., 2024

Abstract. We address the problem of improving the calculation accuracy of power flow in a medium-voltage distribution network based on the measurements of smart meters installed on the secondary side of 6(10)/0.4 kV transformers. In order to account for the effect of unbalanced loads in the low-voltage network on power flow in the medium-voltage network, three-phase three-wire lines were reduced to a single-line option. This enabled the use of symmetric mode calculation programs for the asymmetric mode. The loads in the medium-voltage network were determined by adding power losses in transformer windings and core to the loads measured on the secondary side of transformers. The calculation of winding power losses using the methods of phase coordinates and symmetrical components involves determination of currents in the windings of each phase according to 48 sections of load capacity and voltage module measurements, performed by the smart meter during the day. The correctness of expressions for calculating power losses in transformer windings is confirmed by the equality of total losses in phase coordinates and symmetrical components. The negative sequence power losses in transformer windings were found to be close to zero, while zero sequence losses are significantly lower than the positive sequence losses for almost all transformers with a double star-zero winding connection scheme, regardless of the load factor and rated power. The conducted studies confirmed the possibility and effectiveness of using smart meter measurements for determining loads and calculating power flow in the medium-voltage network. This conclusion was illustrated using an actual distribution network with 26 transformers. Future research should aim to clarify the mathematical models of transformers in the joint calculation of medium- and low-voltage distribution networks.

Keywords: distribution network, smart balanced meters, load imbalance, load flow, phase coordinates, symmetrical components

Acknowledgements. The research was carried out under the State Assignment Project (no. FWEU-2021-0001) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation for the period from 2021 to 2030.

For citation: Voitov O.N., Golub I.I., Semenova L.V., Karpova E.V., Buchinsky A.L. Effects of unbalanced loads in a low-voltage network on flow distribution in a medium-voltage network. *iPolytech Journal.* 2024;28(2):247-260. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-247-260. EDN: XKQPGA.

ВВЕДЕНИЕ

Распределительные сети являются частью электроэнергетической системы, ответственной за обеспечение энергией конечных потребителей. Перечень задач, для которых необходима информация о нагрузках и потокораспределении в распределительных сетях среднего напряжения (СН), являющихся питающими для сетей низкого напряжения (НН), очень широк. Это оценка потерь энергии, регулирование реактивной мощности и напряжения, оптимизация размещения источников генерации, реконфигурация сети, прогнозирование нагрузок, усиление сети, релейная защита и автоматика. Расчет режима распределительной сети СН может производиться по информации о контрольном замере и краткосрочных прогнозах нагрузок. Внедрение в распределительных сетях интеллектуальных систем учета (ИСУ) электрической энергии дает возможность использовать измерения интеллектуальных счетчиков (ИС) для расчета режимов не только в сетях НН, но и в сетях СН.

Интеллектуальный счетчик способен записывать и сохранять потребление электроэнергии через определенные промежутки времени, например, каждые 15, 30 или 60 мин. Так, для анализа режимов низковольтных фидеров используются [1] фазные значения средних значений модулей напряжений активной и реактивной мощностей, измеряемые балансным ИС на стороне вторичного напряжения распределительного трансформатора в узле питания фидера и ИС, устанавливаемых в точках потребления электроэнергии.

О росте интереса к применению измерений ИС для расчета потокораспределения в сети СН свидетельствует множество работ, анализируемых в [2]. Наибольший интерес представляют измерения балансовых ИС на стороне вторичного напряжения распределительного трансформатора, используемые для определения узловой информации о фазных нагрузках сети СН, для чего необходимо предварительно обработать эти измерения, в частности, перенести их со вторичной на первичную сторону трансформатора.

В работе [3] проиллюстрирована реализация алгоритма приведения трехфазной трехпроводной сети к однолинейному представлению [4, 5] для вычисления потокораспределения несбалансированной распределительной сети программой расчета симметричных режимов.

Основной проблемой, исследуемой в работе, явился метод моделирования трансформаторов 6(10)/0,4 кВ, применяемых в российских распределительных сетях для связи сетей СН и НН, которые, в отличие от других стран, имеют схему соединения обмо-

ток Y/Yn (звезда/звезда с нулем). Авторы работы [6] дают представление матриц узловых проводимостей для девяти схем соединения обмоток трансформаторов, включающих и матрицу проводимости трансформатора для схемы соединения обмоток Y/Yn.

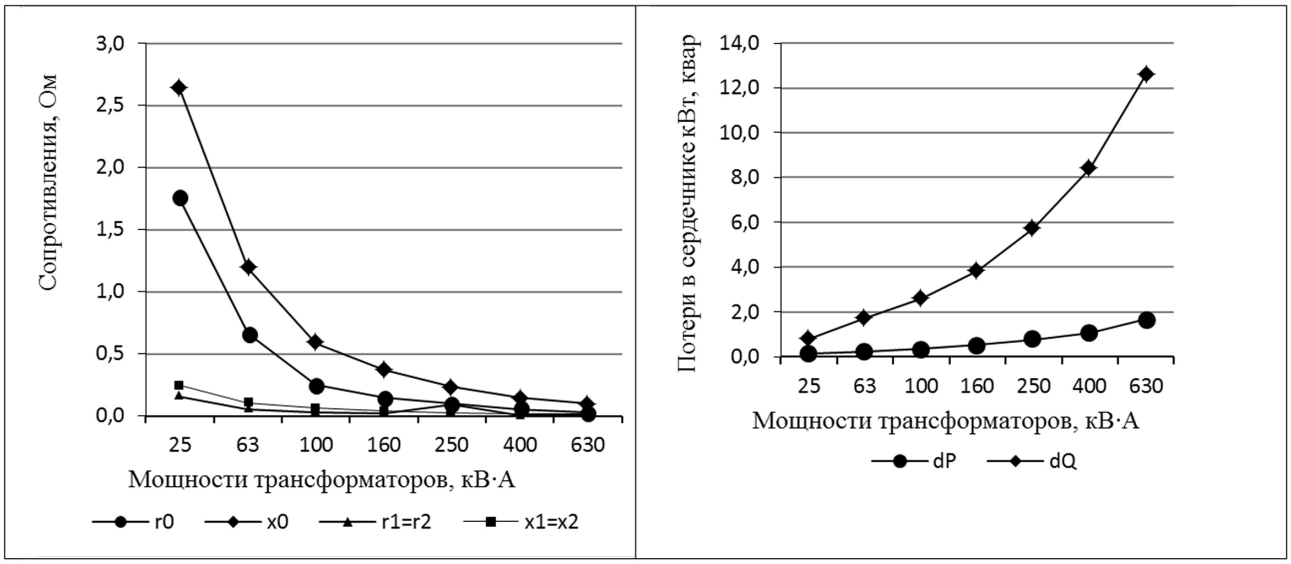
В работе [7] анализируется возможность расчета потокораспределения в распределительной сети с несбалансированными нагрузками с трансформаторами, имеющими различные схемы соединения обмоток, популярным методом прямого и обратного хода [8] для расчета режима разомкнутой сети, однако в [7] схема соединения обмоток трансформатора Y/Yn не анализируется.

В работе [9] симметричные составляющие сопротивлений трансформаторов используются для построения матриц сопротивлений в фазных координатах, где каждое соединение состоит либо из трех однофазных блоков, либо из одного трехфазного блока.

Глубокое многолетнее изучение применяемых в российских распределительных сетях трансформаторов со схемой Y/Yn проводится в работах [10, 11], где отмечается существенное превышение значений сопротивлений нулевой последовательности над сопротивлениями прямой последовательности, которое при несимметричной нагрузке трансформатора приводит к несимметрии фазных напряжений. Важным результатом, представленным в [11], является полученное на физической модели экспериментальное доказательство совпадения критерия потерь, равного отношению потерь мощности от токов обратной и нулевой последовательностей к потерям от токов прямой последовательности, с результатами определения этого критерия на расчетной модели. В частности, на примере однофазной нагрузки показано, что дополнительные потери активной мощности от токов нулевой последовательности в трансформаторах могут существенно превышать потери от токов прямой последовательности.

На графиках рис. 1 *a* для понижающих трансформаторов Y/Yn 6(10)/0,4 кВ различной номинальной мощности (от 25 до 630 кВ·А) показано, как изменяются соответствующие этим мощностям активные и индуктивные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей. Чем меньше номинальная мощность трансформатора, тем в большей степени активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности превышают сопротивления прямой (обратной) последовательности. На рис. 1 *b* показаны графики зависимостей потерь активной и реактивной мощностей в сердечнике трансформатора от его номинальной мощности.

Очевидно, что полная и точная трехфазная модель трансформаторов должна учи-



a *b*

Рис. 1. *Активные и индуктивные сопротивления нулевой r0, x0, прямой r1, x1 и обратной r2, x2 последовательностей (a), потери активной dP и реактивной dQ мощности в сердечнике трансформаторов 6(10)/0,4 кВ (b)*
Fig. 1. *Resistance and reactance of r0, x0 zero-sequence, r1, x1 positive sequence and r2, x2 negative sequence (a), losses of dP active and dQ reactive power in the cores of 6(10)/0.4 kV transformers (b)*

тывать и потери в сердечнике. Так, в работе [8] рекомендуются при несимметричной нагрузке потери в сердечнике, отнесенные к каждой фазе, определять экспериментально. К такому же выводу приходят авторы [20], рекомендующие потери в сердечнике трансформатора, отнесенные к каждой фазе, учитывать шунтирующими сопротивлениями, подключенными ко вторичной обмотке трансформатора.

В данной работе справочные значения потерь активной и реактивной мощностей в сердечнике трансформатора разносились поровну между фазами. При определении мощностей на первичной стороне СН трансформатора эти потери суммировались с потерями в обмотках трансформатора и добавлялись к нагрузкам фаз трансформатора, измеряемым балансовыми ИС на стороне НН.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ БАЛАНСОВОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО СЧЕТЧИКА

Алгоритм вычисления потерь организован следующим образом. Токи $I^f = I_a^f + jI_r^f$ в обмотках каждой фазы $f = a,b,c$ понижающего распределительного трансформатора определялись по измерениям средних фазных значений активной и реактивной мощностей $P^f + jQ^f$ и модулей напряжений U^f, выполненных установленным на вторичной стороне трансформатора трехфазным балансовым ИС:

$$I^f = I_a^f - jI_r^f = \left(P^f - jQ^f\right)/U^f. \quad (1)$$

Для определения суммарных потерь мощности в обмотках трансформатора использовалось выражение:

$$\Delta S = I^T Z_{abc} I, \quad (2)$$

где I^T и I вектор-строка и вектор-столбец фазных токов, а Z_{abc} – матрица фазных сопротивлений, полученная по диагональной матрице Z_{120} сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей z_1, z_2, z_0 и матрице A перехода от симметричных составляющих к фазным координатам:

$$Z_{abc} = AZ_{120}A^{-1}. \quad (3)$$

Потери мощности в фазных обмотках вычислялись как

$$\Delta S^f = \Delta P^f + j\Delta Q^f = I^T Z_f I, \quad (4)$$

где Z_f – строка матрицы Z_{abc}, соответствующая фазе f.

Суммарные потери активных и реактивных мощностей, вычисленные по фазным токам, должны совпадать с потерями мощности, найденными по симметричным составляющим фазных токов и сопротивлениям прямой, обратной и нулевой последовательностей. Для доказательства этого утверждения надо определить вектор I_{120}, компонентами которого являются токи I_1, I_2, I_0 прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$I_{120} = A^{-1}I, \quad (5)$$

на основе которых определяются потери активной и реактивной мощностей прямой, обратной и нулевой последовательностей.

$$\Delta S^{120} = \Delta P^{120} + j\Delta Q^{120} = 3(I_1 I_1^* r_1 + I_2 I_2^* r_2 + I_0 I_0^* r_0) + .$$
$$+ j3(I_1 I_1^* x_1 + I_2 I_2^* x_2 + I_0 I_0^* x_0) = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_0 +$$
$$+ j\left(\Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_0\right). \quad (6)$$

Проиллюстрируем вычисление потерь мощности в понижающем распределительном трансформаторе с номинальной мощностью 160 кВ·А, обеспечивающим питание однофазных и трехфазных нагрузок 39 жилых домов реальной электрической сети. На вторичной стороне трансформатора установлен трехфазный балансовый ИС, измеряющий в фазах средние значения активной и реактивной мощностей и модулей напряжений с интервалом измерений, равным 30 мин.

На рис. 2 для 48 срезов измерений (под срезами измерений понимается набор записей одновременных показаний всех ИС с заданным интервалом между записями) представлены графики модулей напряжений в фазах *a, b и c*, а на рис. 3 и рис. 4 графики активных и реактивных мощностей, на основе которых получены значения симметричных составляющих потерь мощности и суммарные потери мощности в обмотках трансформатора.

Для определения суммарных потерь мощности и потерь в обмотках каждой фазы трансформатора использовались выражения (2) и (4), а для определения потерь для каждой симметричной составляющей и суммарных потерь – выражение (6).

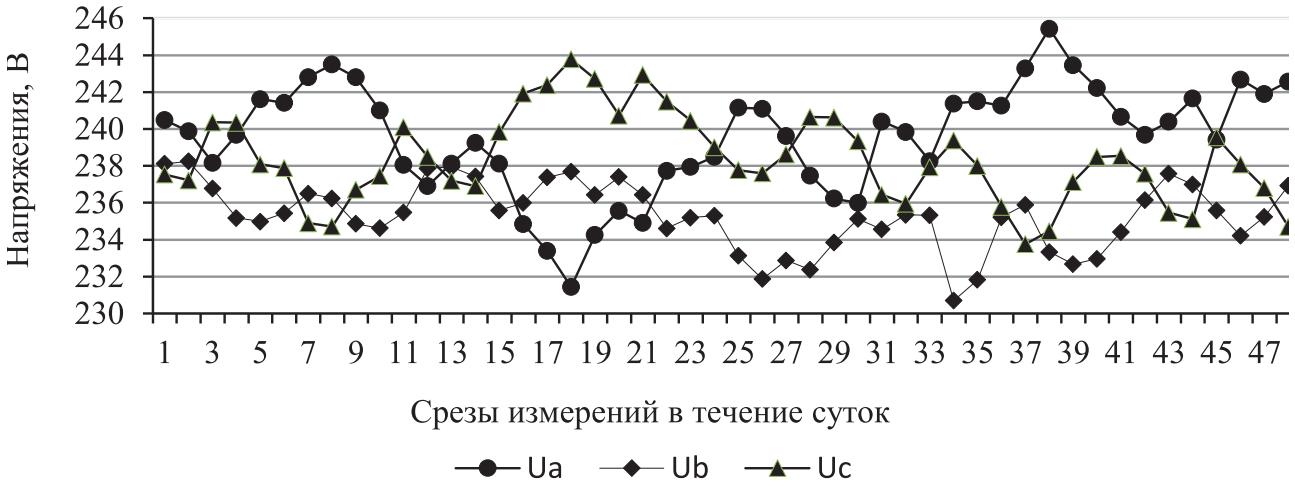


Рис. 2. *Модули напряжений в фазах a, в, c на вторичной стороне трансформатора*
Fig. 2. *Voltage modules in the phases a, в, c on the transformer secondary side*

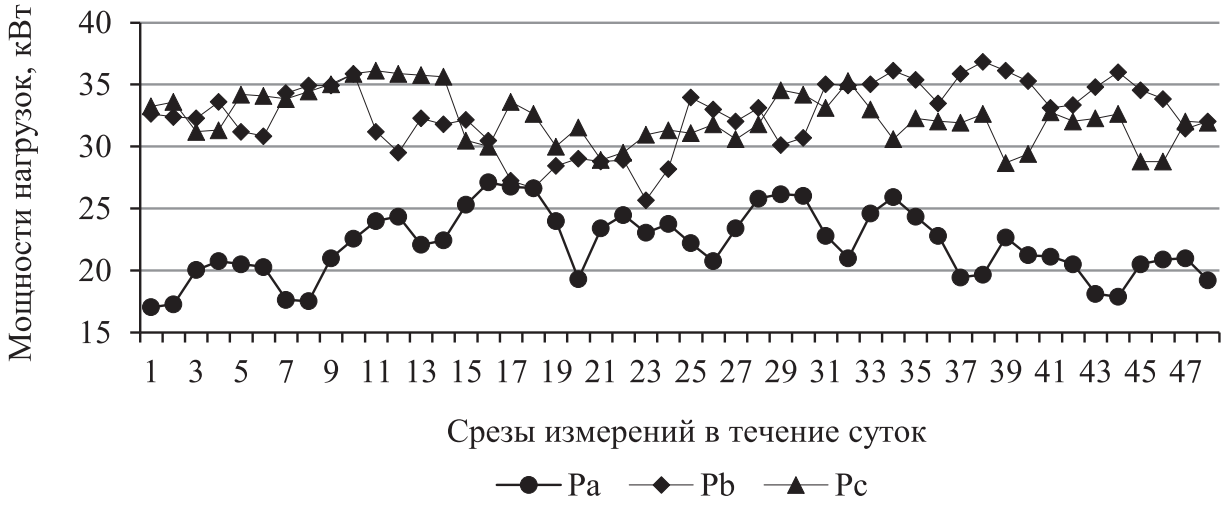


Рис. 3. *Активные мощности нагрузок в фазах a, в, c на вторичной стороне трансформатора*
Fig. 3. *Active power of loads in the phases a, в, c on the transformer secondary side*

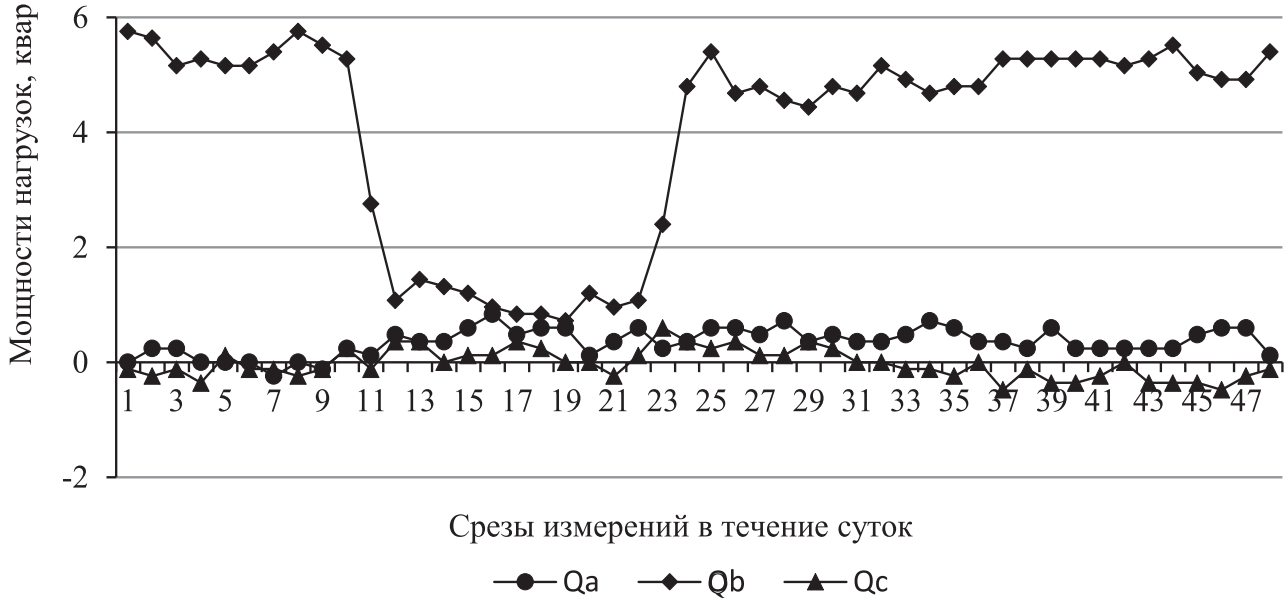


Рис. 4. *Реактивные мощности нагрузок в фазах a, в, c на вторичной стороне трансформатора*
Fig. 4. *Reactive power of loads in the phases a, в, c on the transformer secondary side*

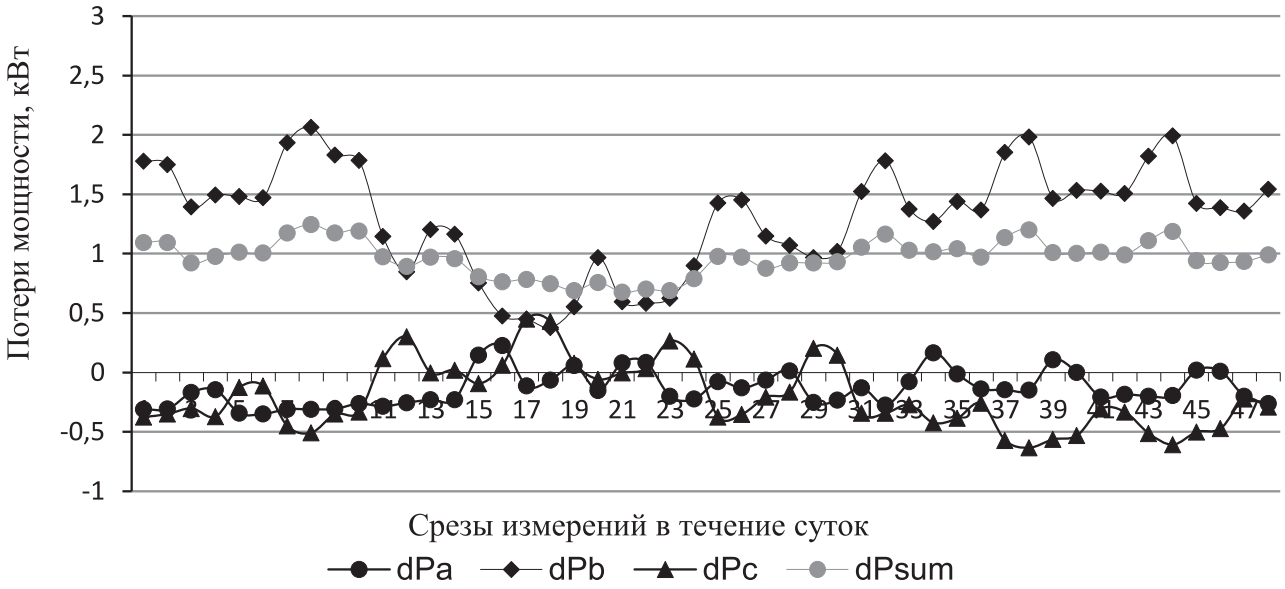


Рис. 5. *Потери активной мощности в обмотках фаз dPa, dPb, dPc и суммарные потери dPsum*
Fig. 5. *Active power losses in dPa, dPb, dPc phase windings and dPsum total losses*

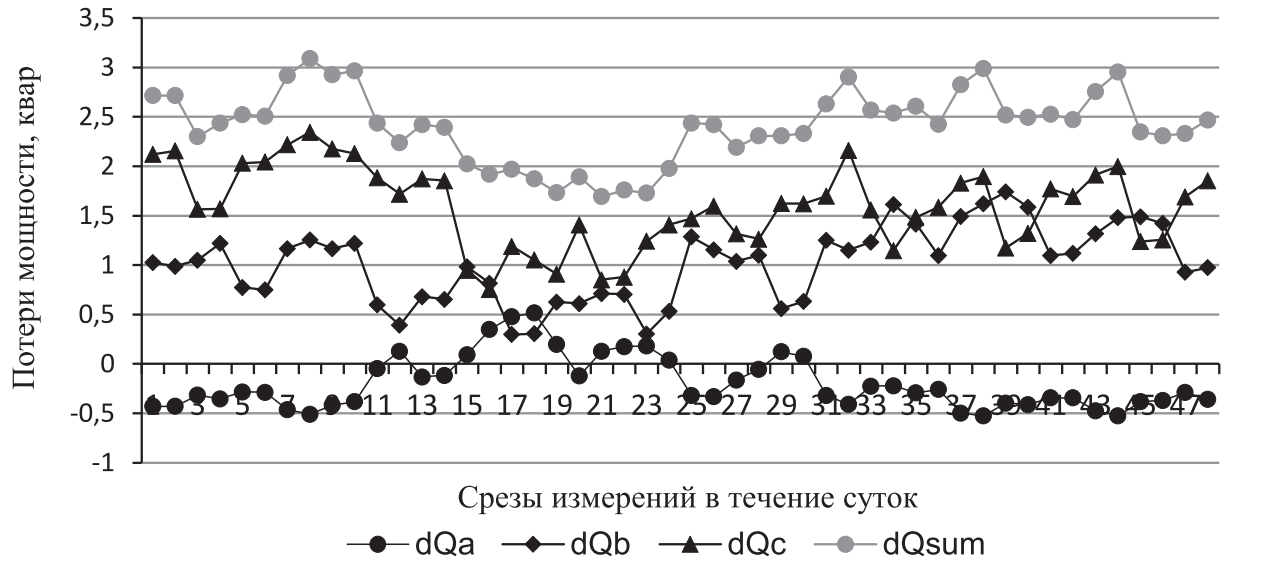


Рис. 6. *Потери реактивной мощности в обмотках фаз dQa, dQb, dQc и суммарные потери dQsum*
Fig. 6. *Reactive power losses in dQa, dQb, dQc phase windings and dQsum total losses*

Графики потерь активной и реактивной мощностей в фазах представлены на рис. 5–6, их анализ показывает наличие в фазах *a* и *c* для активной мощности и в фазе *a* для реактивной мощности отрицательных потерь во многих срезах измерений.

Отрицательные потери при вычислении по мощностям нагрузок на вторичной стороне трансформатора нагрузок на первичной стороне приведут к снижению нагрузок, а положительные потери – к их увеличению. Доказательством справедливости полученного результата, связанного с наличием отрицательных потерь, является совпадение суммарных потерь активной и реактивной мощностей в фазах (рис. 5–6) с суммарными потерями, полученными для симметричных составляющих (рис. 7).

Анализ графиков (рис. 7) показывает, что потери активной и реактивной мощностей обратной последовательности практически равны нулю, а потери активной и реактивной мощностей прямой последовательности существенно выше потерь нулевой последовательности для срезов измерений в течение суток.

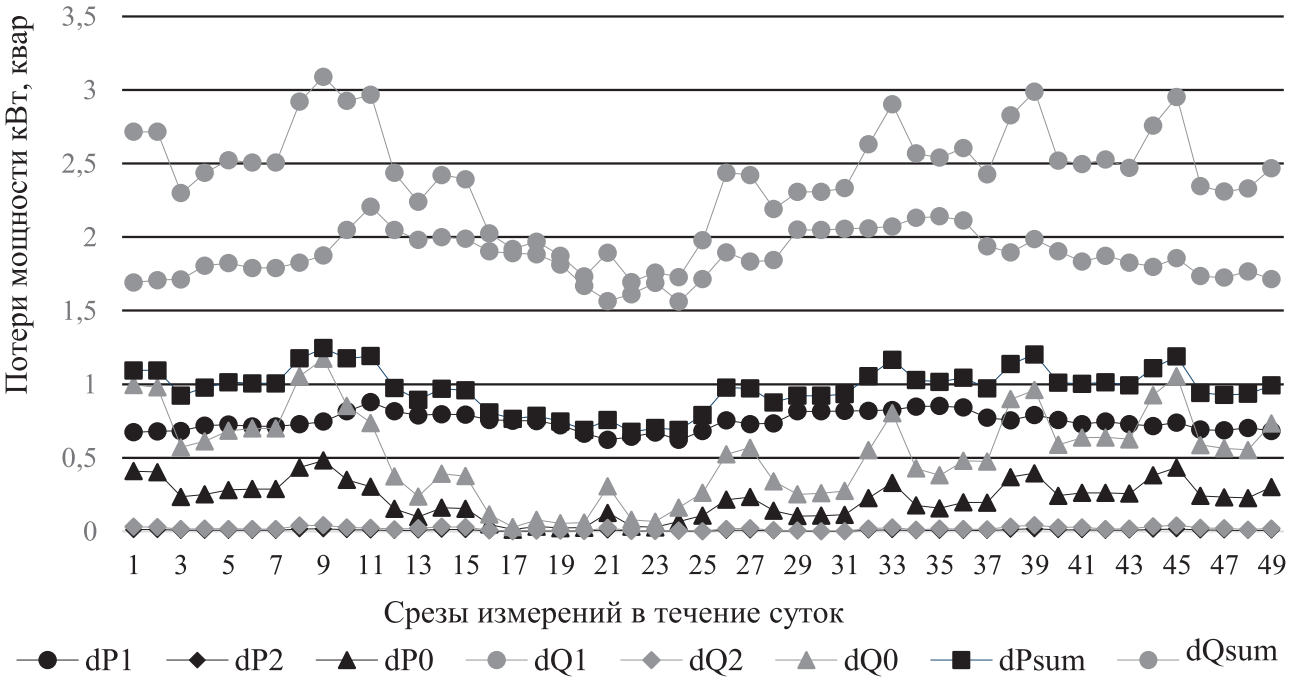


Рис. 7. *Составляющие потерь активной и реактивной мощности прямой dP1, dQ1, обратной dP2, dQ2, нулевой dP0, dQ0 последовательностей и суммарные потери dPsum, dQsum в обмотках трансформаторов*
Fig. 7. *Active and reactive power loss components of dP1, dQ1 positive sequence, dP2, dQ2 negative sequence, dP0, dQ0 zero-sequence and dPsum, dQsum total losses in transformer windings*

Рис. 8. *Отношение потерь активной мощности нулевой к прямой последовательности в обмотках трансформатора, dP0/dP1*
Fig. 8. *Ratio of zero-sequence active power losses to positive-sequence active power losses in dP0/dP1 transformer windings*

Суммарные за сутки потери энергии в трансформаторе, составившие 45,173 кВт·ч, включают потери в обмотках и в стали, соответственно, равные 32,213 кВт·ч и 12,96 кВт·ч. Дополнительные расчеты показали, что суточные потери энергии в трансформаторе в 3 раза меньше фактических потерь в связанном с трансформатором фидере НН, суммарные суточные потери в фазах а, в, с которого равны 21,214 + 67,266 + 51,849 = 140,326 кВт·ч.

На рис. 8 приведен график, показывающий, что для используемого трансформатора с номинальной мощностью 160 кВ·А максимальное отношение потерь активной мощности нулевой последовательности к потерям мощности прямой последовательности в обмотках трансформатора для 9 среза измерений равно 0,645, при этом отношение активных (реактивных) сопротивлений нулевой и прямой последовательностей обмоток трансформатора равно 7,5 (9,25).

РАСЧЕТ НЕСБАЛАНСИРОВАННОГО РЕЖИМА РЕАЛЬНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ БАЛАНСОВЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЧЕТЧИКОВ

Проиллюстрируем расчет режима трехфазной трехпроводной сети по измерениям фазных значений активных и реактивных нагрузок и модулей напряжений на вторичной стороне трансформаторов. Реальная распределительная сеть 6 кВ, эквивалентная схема которой приведена на рис. 9, включает 63 узла, 62 линии суммарной длины 38,6 км.

На рис. 9 черным цветом отмечены 26 узлов, к которым подключены распределительные трансформаторы 6/0,4 кВ с несбалансированной трехфазной нагрузкой на вторичной стороне, номинальные мощности трансформаторов указаны на диаграммах рис. 10. Мощности четырех трансформаторов равны 630 кВ·А, восьми – 400 кВ·А, четырех – 160 кВ·А, двух – 100 кВ·А, пяти – 63 кВ·А и одного – 25 кВ·А.

По измеренным балансовым счетчикам – нагрузкам и модулям напряжений – на вторичной стороне трансформаторов, в соответствии с предложенным алгоритмом, были определены потери мощности в фазах и нагрузки на первичной стороне. Для этого вначале на вторичной стороне каждого трансформатора, согласно (1), были рассчитаны векторы фазных токов. Затем фазные токи совместно с сопротивлениями фаз, полученными на основе симметричных составляющих сопротивлений трансформатора, использовались для разнесения как положительных, так и отрицательных потерь в обмотках трансформатора по фазам в соответствии с выражением (4).

На рис. 11 и рис. 13 в узлах с трансформаторами показаны потери активной и реактивной мощностей в фазах, а на рис. 12 и рис. 14 – симметричные составляющие потерь активной и реактивной мощностей.

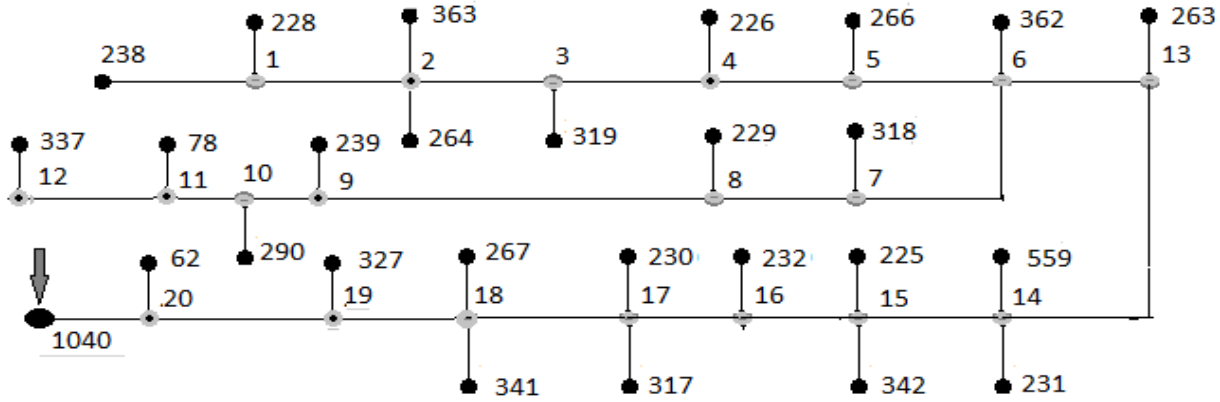


Рис. 9. *Схема реальной распределительной сети среднего напряжения*
Fig. 9. *Diagram of a real medium voltage distribution network*

Рис. 10. *Номинальные мощности трансформаторов в узлах распределительной сети, рис. 8*
Fig. 10. *Transformer rated powers in distribution network nodes, Fig. 8*

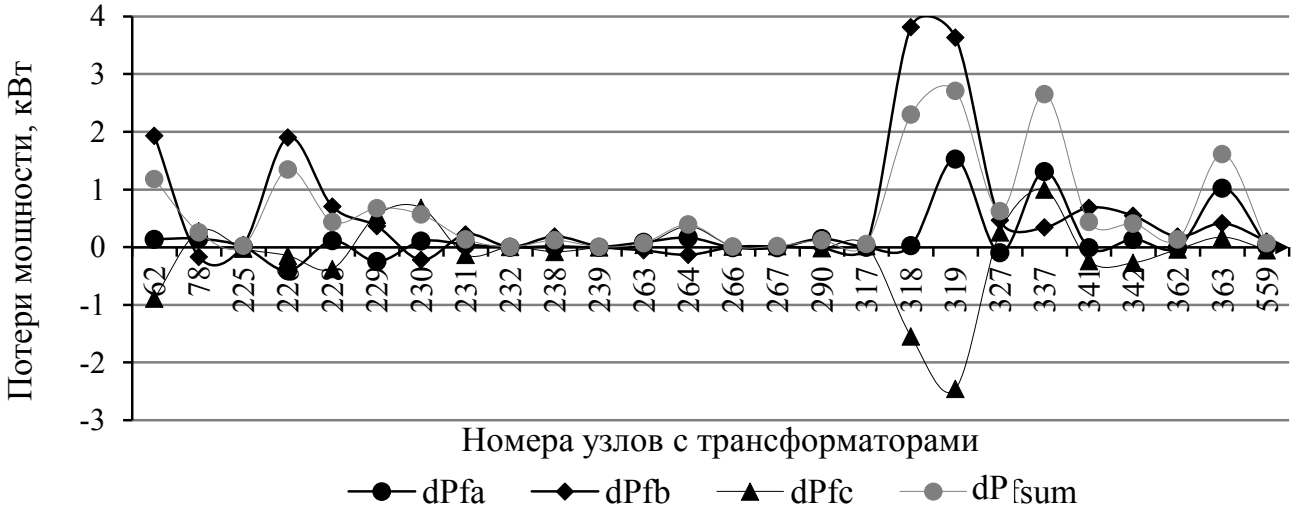


Рис. 11. *Потери активной мощности в фазных обмотках dPfa, dPfb, dPfc и суммарные потери dPfsum*
Fig. 11. *Active power losses in dPfa, dPfb, dPfc phase windings and dPfsum total losses*

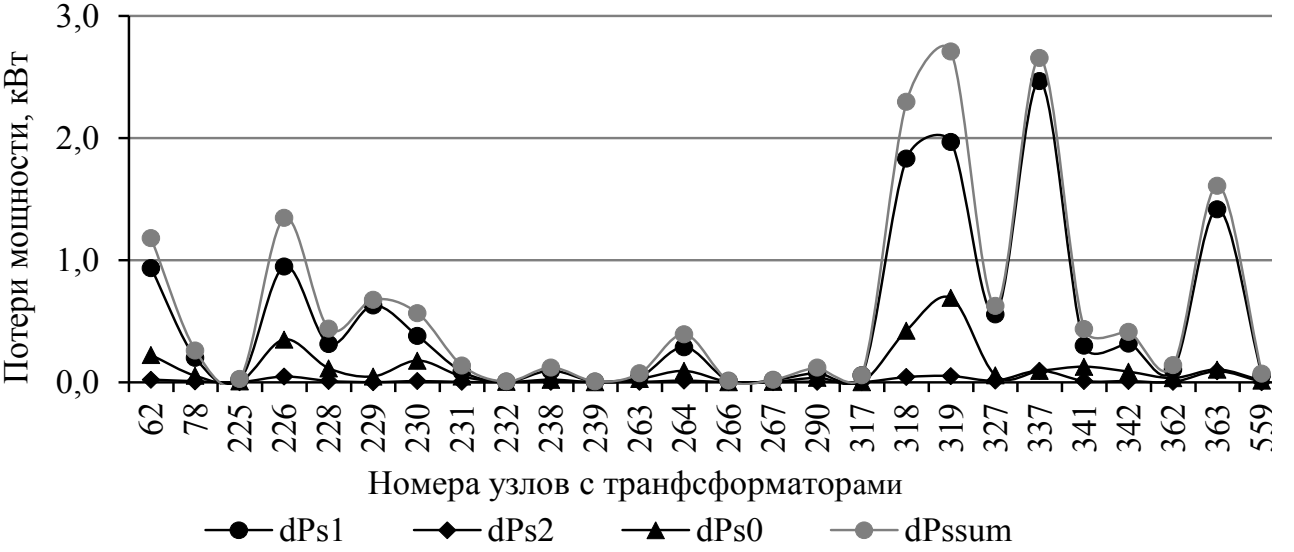


Рис. 12. *Симметричные составляющие потерь активной мощности Psim1, Psim2, Psim0 и суммарные потери Pssum*
Fig. 12. *Symmetrical components of Psim1, Psim2, Psim0 active power losses and Pssum total losses*

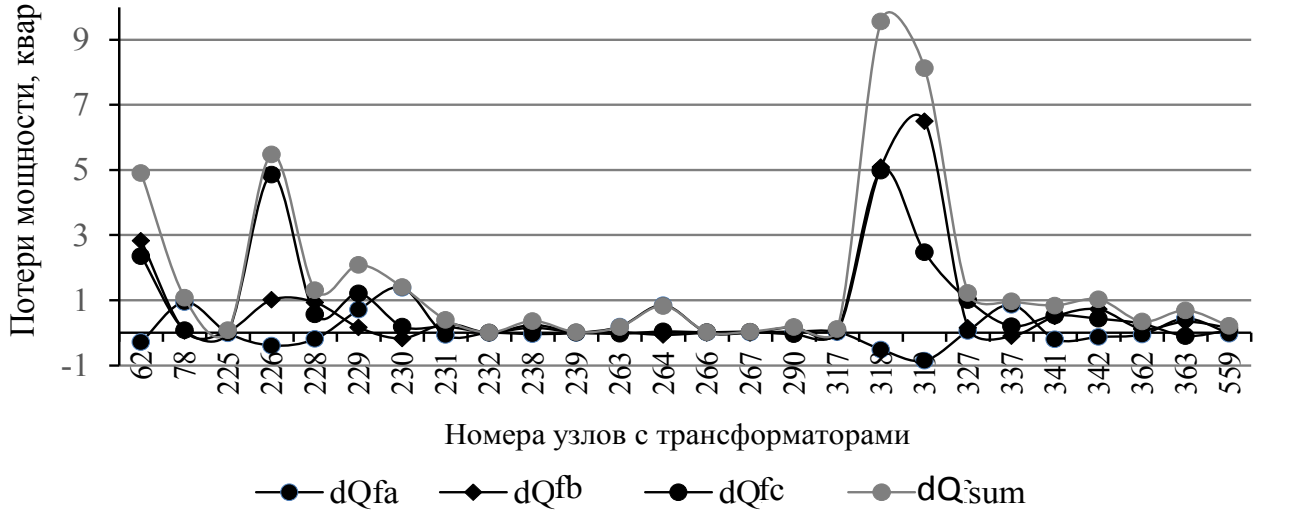


Рис. 13. *Потери реактивной мощности в фазных обмотках dQfa, dQfb, dQfc и суммарные потери dQfsum*
Рис. 13. *Reactive power losses in dQfa, dQfb, dQfc phase windings and dQfsum total losses*

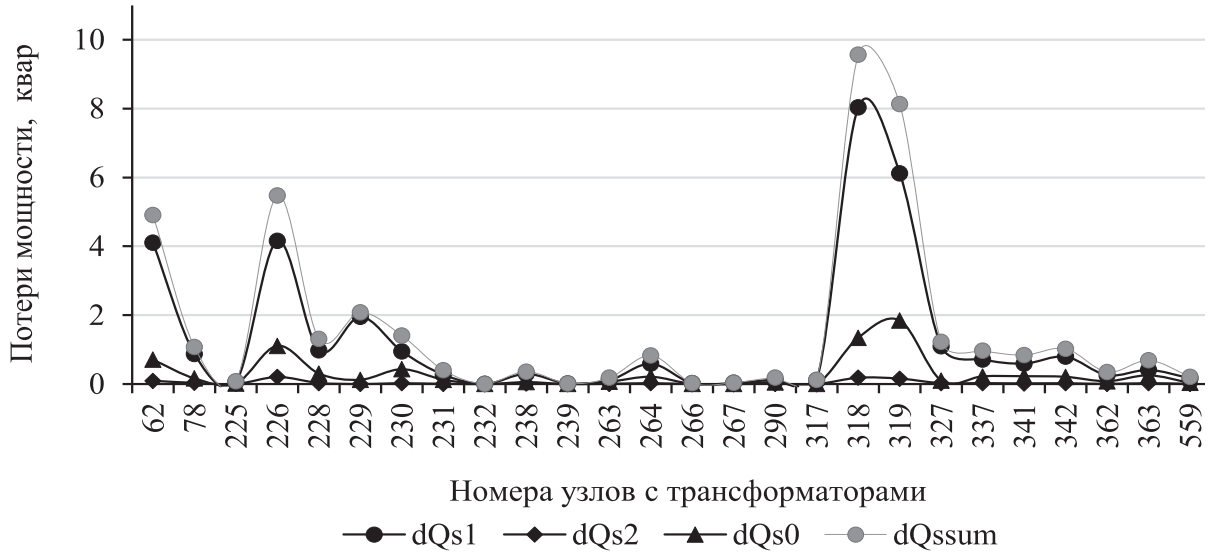


Рис. 14. *Симметричные составляющие потерь реактивной мощности Qsim1, Qsim2, Qsim0 и суммарные потери Qssum*
Fig. 14. *Symmetrical components of Qsim1, Qsim2, Qsim0 reactive power losses and Qssum total losses*

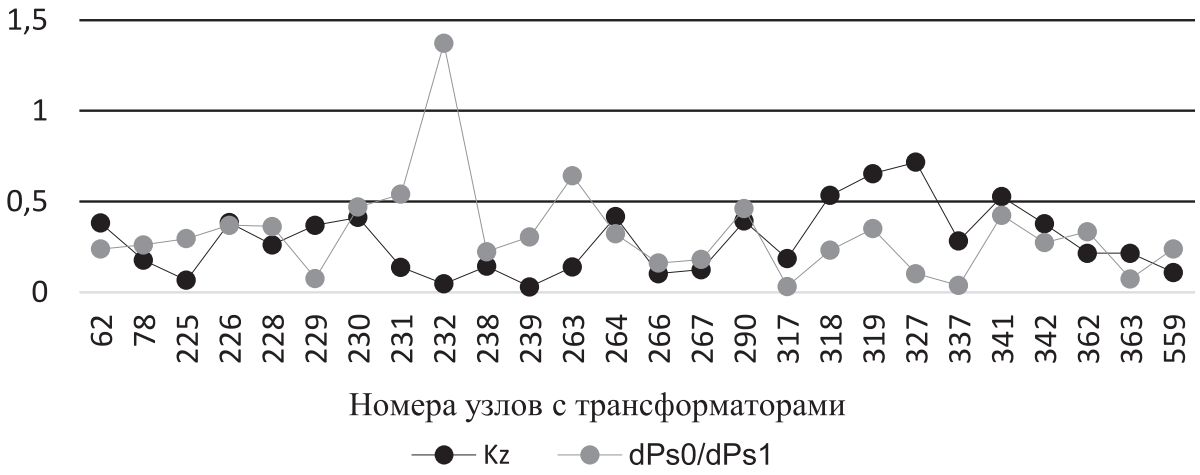


Рис. 15. *Коэффициенты загрузки Kz трансформаторов и отношение потерь активной мошности нулевой к прямой последовательности dPs0/dPs1*
Fig. 15. *Kz transformer load factors and dPs0/dPs1 ratio of zero-sequence active power losses to positive-sequence active power losses*

Анализ показанных на рис. 15 графиков коэффициентов загрузки трансформаторов, равных отношению полной мощности нагрузки трансформатора к его номинальной мощности, и графиков отношения потерь активной мощности нулевой и прямой последовательностей показывает, что при небольшой загрузке отношение потерь может быть очень большим, например, в узле 232, и, наоборот, как в узле 327, большому коэффициенту загрузки соответствует небольшое значение отношения потерь.

Нагрузки на первичной стороне трансформаторов, найденные в результате добавления потерь мощности в обмотках и сердечниках трансформаторов к нагрузкам на первичной стороне, использовались для расчета потокораспределения в сети СН, показавшего, что модули фазных напряжений в трансформаторных узлах несимметричны, рис. 16.

Проведенный анализ коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности на первичной стороне всех распределительных трансформаторов, равный отношению напряжений нулевой и прямой последовательностей, $K_{0U_i} = \left(U_{0_i} / U_{1_i}\right) 100\%, i = 1,...n$, где n – число узлов с трансформаторами, показал, что для всех трансформаторов K_{0U}% не превышает значения 0,9%.

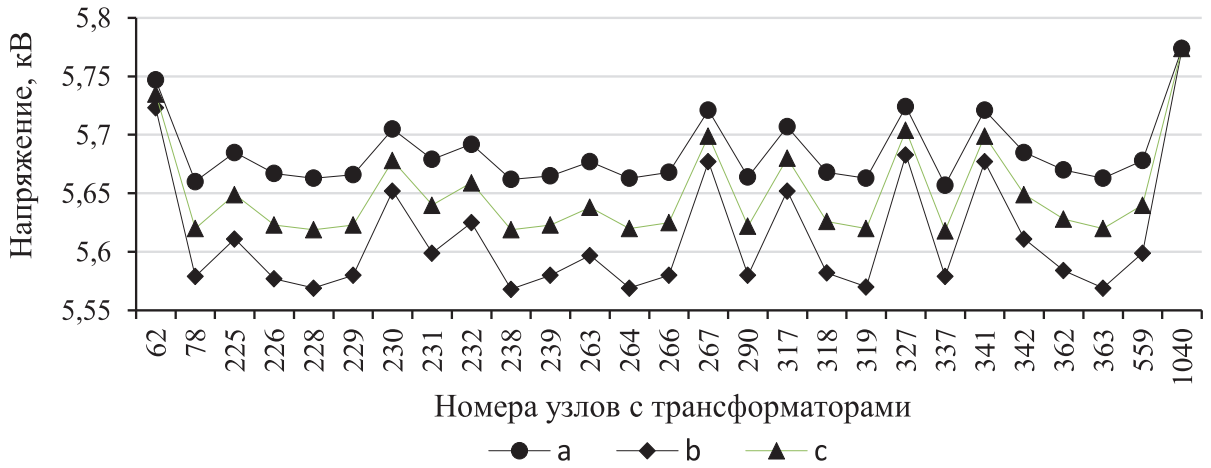


Рис. 16. *Модули напряжений в фазах a, b, c в трансформаторных узлах*
Fig. 16. *Voltage modules in the phases a, b, c in transformer nodes*

Потери мощности в сети СН составили в фазе *a* – 8,7 кВт, 7,1 квар, в фазе *b* – 21,4 кВт,15,9 квар, в фазе *c* – 15,3 кВт, 18,6 квар, а суммарные потери – 45,3 кВт и 41,7 квар, сравнение которых с суммарными потерями в обмотках и сердечниках трансформаторов, равными 16,4 кВт и 41,5 квар, показывает близость этих значений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На примере данных об измеренных балансовым интеллектуальным счетчиком фазных значений активной и реактивной мощностей и модулей напряжений на вторичной стороне распределительного трансформатора исследовано влияние несимметрии нагрузок сети низкого напряжения на составляющие потерь прямой обратной и нулевой последовательностей в обмотках трансформатора.

2. Для трансформатора с номинальной мощностью 160 кВ·А показано, что для всех 48 срезов измерений интеллектуального балансового счетчика потери обратной последовательности активной и реактивной мощностей в обмотках трансформатора практически равны нулю, а потери активной мощности нулевой последовательности в течение суток не превышают 0,645 от потерь прямой последовательности.

3. Исследование изменения в фазных координатах потерь как активной, так и реактивной мощности в обмотках трансформаторов для 48 срезов измерений показало наличие отрицательных потерь, которые при расчете мощности, поступающей в трансформатор, приведут к ее снижению, при этом суммарные потери энергии в обмотках трансформатора в течение суток составляют 18,669% от суммарных потерь в низковольтном фидере.

4. Для измеренных балансными счетчиками нагрузок и модулей напряжений на вторичной стороне 26 распределительных трансформаторов с различной номинальной мощностью со схемой Y/Yn проведен расчет потерь мощности в обмотках в симметричных составляющих и в фазных координатах, показавший, что несмотря на существенное превышение сопротивлениями нулевой последовательности трансформаторов, особенно малой номинальной мощности, сопротивлений прямой последовательности, отношение потерь мощностей этих последовательностей невелико.

5. Для окончательного решения проблемы перенесения измерений со вторичной стороны распределительных трансформаторов на первичную сторону необходим измерительный эксперимент.

Список источников

1. Golub I., Boloev E. Determination of losses in distribution networks by smart meter measurements // International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering. 2021. https://doi.org/10.1109/ICECCE52056.2021.9514102. EDN: ASHCFA.
2. Ni Fei, Nguyen Phuong Hong, Cobben J.F.G, Van den Brom H.E. Three-phase state estimation in the medium voltage network with aggregated smart meter data // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018. Vol. 98. Iss. 3. P. 463–473. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.033.

3. Yang Yong, Chen Zhu, Yan Jing, Xiong Zhi, Zhang Jun, Yuan Hongxia, et al. State evaluation of power transformer based on digital twin // IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (Zhengzhou, 6–8 November 2019). Zhengzhou: IEEE, 2019. P. 230–235. https://doi.org/10.1109/SOLI48380.2019.8955043.
4. Golub I., Voitov O., Boloev E., Semenova L. Reconfiguration of a primary three-phase three-wire distribution network with unbalanced loads // ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management: Web of Conferences. 2020. Vol. 209. P. 02013. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020902013.
5. Laughton M.A. Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase co-ordinates. Part 1: System representation in phase frame of reference // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1968. Vol. 115. Iss. 8. P. 1163–1172. https://doi.org/10.1049/piee.1968.0206.
6. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional mathematical models of railway electric systems // Innovation & Sustainability of Modern Railway – Proceedings of ISMR'2008. Beijing: China Railway Publishing House, 2008. P. 504–508.
7. Chen Tsai-Hsiang, Chen Mo-Shing, Hwang K.-J., Kotas P., Chebli E. Distribution system power flow analysis-a rigid approach // IEEE Transactions on Power Delivery. 1991. Vol. 6. Iss. 3. P. 1146–1152. https://doi.org/10.1109/61.85860.
8. Chen Tsai-Hsiang, Chen Mo-Shing, Inoue T., Kotas P., Chebli E. Three phase cogenerator and transformer models for distribution system analysis // IEEE Transactions on Power Delivery. 1991. Vol. 6. Iss. 4. P. 1671–1681. https://doi.org/10.1109/61.97706.
9. Kersting W.H., Phillips W.H., Carr W. A new approach to modeling three-phase transformer connections // IEEE Transactions on Industry Applications. 1999. Vol. 35. No. 1. P. 169–175. https://doi.org/10.1109/REPCON.1998.666943.
10. Kersting W.H. Distribution system modeling and analysis. Florida: CRC Press LLC, 2002. 314 p.
11. Chen Tsai-Hsiang, Chang Yung-Liang. Integrated models of distribution transformers and their loads for three-phase power flow analyses // IEEE Transactions on Power Delivery. 1996. Vol. 11. Iss. 1. P. 507–513. https://doi.org/10.1109/61.484135.
12. Wang Zhuding, Chen Fen, Li Jingui. Implementing transformer nodal admittance matrices into backward/forward sweep-based power flow analysis for unbalanced radial distribution systems // IEEE Transactions on Power Systems. 2004. Vol. 19. Iss. 4. P. 1831–1836. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.835659.
13. Chen Gaojie J., Li K.K., Chung T.S., Tang G.Q. An efficient two-stage load flow method for meshed distribution networks // International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-00 (Hong Kong, 30 October 2000 – 1 November 2000). Hong Kong: IET, 2000. P. 537–542. https://doi.org/10.1049/cp:20000458.
14. Dzafic I., Jabr R.A., Neisius H.T. Transformer modeling for three-phase distribution network analysis // IEEE Transactions on Power Systems. 2015. Vol. 30. Iss. 5. P. 2604–2611. https://ieeexplore.ieee.org/document/6917225.
15. Мартынов В.А. Несимметричные режимы работы силовых трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Y_0 // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2009. № 2. С. 88–91. EDN: KWPMBJ.
16. Пустоветов М.Ю. Математическая модель трехфазного трансформатора // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2012. Т. 321. № 4. С. 97–100. EDN: PUTXMF.
17. Серебряков А.С., Осокин В.Л. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов при соединении обмоток по схеме Y/Y – 0 и Y/Y_0 – 0 // Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического университета. 2017. № 3. С. 50–57. EDN: YHPSZZ.
18. Косоухов Ф.Д., Васильев Н.В., Борошнин А.Л., Филиппов А.О., Криштопа Н.Ю., Кузнецова Е.С. Энергосбережение в низковольтных электрических сетях при несимметричной нагрузке: монография. СПб.: Лань, 2022. 280 с. EDN: YRAMDD.
19. Косоухов Ф.Д., Епифанов А.П., Васильев Н.В., Криштопа Н.Ю., Горбунов А.О., Борошнин А.Л. Критерий потерь мощности от несимметричных токов в трехфазных трансформаторах и четырехпроводных линиях // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № 6. С. 64–72.
20. Xiao Peng, Yu David C., Yan Wei. A unified three-phase transformer model for distribution load flow calculations // IEEE Transactions on Power Systems. 2006. Vol. 21. Iss. 1. P. 153–159. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.857847.

References

1. Golub I., Boloev E. Determination of losses in distribution networks by smart meter measurements. In: *International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering*. 2021. https://doi.org/10.1109/ICECCE52056.2021.9514102. EDN: ASHCFA.
2. Ni Fei, Nguyen Phuong Hong, Cobben J.F.G, Van den Brom H.E. Three-phase state estimation in the medium

voltage network with aggregated smart meter data. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.* 2018;98(3):463-473. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.033.
3. Yang Yong, Chen Zhu, Yan Jing, Xiong Zhi, Zhang Jun, Yuan Hongxia, et al. State evaluation of power transformer based on digital twin. In: *IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*. 6–8 November 2019, Zhengzhou. Zhengzhou: IEEE; 2019, p. 230-235. https://doi.org/10.1109/SOLI48380.2019.8955043.
4. Golub I., Voitov O., Boloev E., Semenova L. Reconfiguration of a primary three-phase three-wire distribution network with unbalanced loads. In: *ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management: Web of Conferences*. 2020 ;209 :02013. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020902013.
5. Laughton M.A. Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase co-ordinates. Part 1: System representation in phase frame of reference. In: *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1968;115(8):1163-1172. https://doi.org/10.1049/piee.1968.0206.
6. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional mathematical models of railway electric systems. In: *Innovation & Sustainability of Modern Railway – Proceedings of ISMR'2008.* Beijing: China Railway Publishing House; 2008, p. 504-508.
7. Chen Tsai-Hsiang, Chen Mo-Shing, Hwang K.-J., Kotas P., Chebli E. Distribution system power flow analysis-a rigid approach. *IEEE Transactions on Power Delivery.* 1991;6(3):1146-1152. https://doi.org/10.1109/61.85860.
8. Chen Tsai-Hsiang, Chen Mo-Shing, Inoue T., Kotas P., Chebli E. Three phase cogenerator and transformer models for distribution system analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery.* 1991;6(4):1671-1681. https://doi.org/10.1109/61.97706.
9. Kersting W.H., Phillips W.H., Carr W. A new approach to modeling three-phase transformer connections. In: *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1999;35(1):169-175. https://doi.org/10.1109/REPCON.1998.666943.
10. Kersting W.H. *Distribution system modeling and analysis*. Florida: CRC Press LLC; 2002, 314 p.
11. Chen Tsai-Hsiang, Chang Yung-Liang. Integrated models of distribution transformers and their loads for three-phase power flow analyses. In: *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1996;11(1):507-513. https://doi.org/10.1109/61.484135.
12. Wang Zhuding, Chen Fen, Li Jingui. Implementing transformer nodal admittance matrices into backward/forward sweep-based power flow analysis for unbalanced radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems.* 2004;19(4):1831-1836. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.835659.
13. Chen Gaojie J., Li K.K., Chung T.S., Tang G.Q. An efficient two-stage load flow method for meshed distribution networks. In: *International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-00*. 30 October 2000 – 1 November 2000, Hong Kong. Hong Kong: IET; 2000, p. 537-542. https://doi.org/10.1049/cp:20000458.
14. Dzafic I., Jabr R.A., Neisius H.T. Transformer modeling for three-phase distribution network analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2015;30(5):2604-2611. https://ieeexplore.ieee.org/document/6917225.
15. Martynov V.A. Asymmetrical operating conditions of power transformers with Y/Y0 windings junction. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University.* 2009;2:88-91. (In Russ.). EDN: KWPMBJ.
16. Pustovetov M.Yu. Mathematical model of a three-phase transformer. *Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2012;321(4):97-100. (In Russ.). EDN: PUTXMF.
17. Serebryakov A.S., Osokin V.L. Unbalanced load of three-phase transformers at connection of windings according to the scheme Y/Y-0 and Y/Y_0-0. *Bulletin NGIEI.* 2017;3:50-57. (In Russ.). EDN: YHPSZZ.
18. Kosoukhov F.D., Vasiliev N.V., Boroshnin A.L., Filippov A.O., Krishtopa N.Yu., Kuznetsova E.S. *Energy saving in low-voltage electrical networks with asymmetric load*. St. Petersburg: Lan'; 2022, 280 p. (In Russ.). EDN: YRAMDD.
19. Kosoukhov F.D., Epifanov A.P., Vasiliev N.V., Krishtopa N.Yu., Gorbunov A.O., Boroshnin A.L. Criterion for asymmetrical current power losses in three-phase transformers and four-wire lines. *Electric Power. Transmission and Distribution.* 2023;6:64-72. (In Russ.).
20. Xiao Peng, Yu David C., Yan Wei. A unified three-phase transformer model for distribution load flow calculations. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2006;21(1):153-159. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.857847.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Войтов Олег Николаевич,
к.т.н., доцент,
старший научный сотрудник отдела
электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
✉ sdo@isem.irk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleg N. Voitov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Senior Researcher of the Department
of Electric Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
✉ sdo@isem.irk.ru

Голуб Ирина Ивановна,
д.т.н., профессор,
ведущий научный сотрудник отдела
электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
golub@isem.irk.ru

Семенова Людмила Васильевна,
научный сотрудник отдела
электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
cdo@isem.irk.ru

Карпова Елена Валерьевна,
аспирант,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
karpova.e.v.96@yandex.ru

Бучинский Анатолий Леонидович,
заместитель генерального директора
по транспорту электроэнергии
ОГУЭП «Облкоммунэнерго»
664075, г. Иркутск, ул. Ширямова,
д. 54, а/я 52, Россия
buchinskiy@oblkomenergo.ru

Irina I. Golub,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Leading Researcher of the Department
of Electric Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
golub@isem.irk.ru

Luydmila V. Semenova,
Researcher of the Department
of Electric Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
cdo@isem.irk.ru

Elena V. Karpova,
Postgraduate Student,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
karpova.e.v.96@yandex.ru

Anatoly L. Buchinsky,
Deputy General Director
for Power Transportation at the
Regional State Unitary Energy Enterprise
«Oblkommunenergo»,
54 Shiryamov St., Irkutsk 664075, P.O. Box 52, Russia,
buchinskiy@oblkomenergo.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 27.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.04.2024 г.; принята к публикации 30.04.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 27.03.2024; approved after reviewing 25.04.2024; accepted for publication 30.04.2024.

iPolytech Journal 2024. Т. 28. № 2. 261-271 ISSN 2782-4004 (print)
2024;28(2):261-271 ISSN 2782-6341 (online)

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья
УДК 621.316.1
EDN: ZWSVER
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-261-271

Управление напряжением в низковольтных распределительных сетях в условиях внедрения домашних зарядных станций электромобилей

В.А. Воронин[1]✉, Ф.С. Непша[2]

[1,2]Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Кемерово, Россия
[2]ООО «РТСофт - Смарт Грид», Москва, Россия

Резюме. Целью работы является изучение влияния домашних зарядных станций электромобилей на отклонение напряжения в пригородной распределительной сети 0,4 кВ. В качестве объекта исследования выбрана трансформаторная подстанция 10/0,4 кВ и распределительная сеть 0,4 кВ, обеспечивающая электроснабжение 114 частных жилых домов. Для оценки влияния домашних зарядных станций на отклонение напряжения была разработана стохастическая квазидинамическая модель электрической сети на языке программирования Python с использованием библиотеки pandapower. Данная модель позволяет моделировать суточные профили электропотребления и напряжения при различном количестве и точках подключения домашних зарядных станций с учетом случайного характера поведения владельцев электромобилей. Для поддержания уровня напряжения в допустимых пределах в работе рассмотрены использование инверторов бортовых зарядных устройств электромобилей в качестве источников реактивной мощности и смещение времени начала заряда электромобилей на ночные часы. По результатам моделирования показано, что при наличии домашней зарядной станции у 30% потребителей пригородной распределительной сети 0,4 кВ загрузка головного участка питающей линии может кратковременно приближаться к 100%, а глубина отрицательных отклонений напряжения превышать 20%. Установлено, что вольт-вар (Volt-Var) регулирование напряжения бортовыми зарядными устройствами электромобилей позволяет значительно сократить отклонения напряжения в распределительной сети (снижение продолжительности отклонений напряжения ниже -5%: с 27,3% до 12,9%) при несущественном влиянии на продолжительность заряда электромобилей. Полученные в настоящем исследовании результаты могут быть использованы при перспективном планировании развития распределительных электрических сетей в условиях широкого распространения электромобилей.

Ключевые слова: электромобили, электрозарядные станции, распределенные энергетические ресурсы, качество электроэнергии, электрический режим, имитационное моделирование

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-082-2).

Для цитирования: Воронин В.А., Непша Ф.С. Управление напряжением в низковольтных распределительных сетях в условиях внедрения домашних зарядных станций электромобилей // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 261–271. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-261-271. EDN: ZWSVER.

POWER ENGINEERING

Original article

Voltage control in low-voltage distribution networks in the context of introducing home charging stations for electric vehicles

Vyacheslav A. Voronin[1]✉, Fedor S. Nepsha[2]

[1,2]T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia
[2]LLC «RTSoft – Smart Grid», Moscow, Russia

Abstract. In this work, we investigate the effect of home charging stations for electric vehicles on voltage deviations in a 0.4 kV suburban distribution network. A 10/0.4 kV transformer substation and a 0.4 kV distribution network, supplying electricity to 114 private residential buildings, were selected as the research objects. In order

© Воронин В.А., Непша Ф.С., 2024

to assess the effect of home charging stations on voltage deviations, a stochastic quasi-dynamic model of the electrical network was developed in the Python programming language using the Pandapower library. This model allows daily profiles of power consumption and voltage to be simulated at various numbers and connection points of home charging stations, taking the random behavior of electric vehicle owners into account. For maintaining the voltage level within the permissible limits, inverters for on-board chargers of electric vehicles in terms of reactive power sources and the shift of the charging start time to the night hours are considered. According to the simulation results, when 30% of 0.4 kV suburban distribution network consumers use a home charging station, the load on the main section of the supply line can briefly approach 100% and the depth of negative voltage deviations can exceed 20%. The Volt-Var control by on-board chargers of electric vehicles was established to reduce significantly voltage deviations in the distribution network (reducing the duration of voltage deviations below −5%, i.e., from 27.3 to 12.9%) with an insignificant effect on the charge duration of electric vehicles. The results obtained can be used in the long-term planning of distribution electric networks in the context of a widespread use of electric vehicles.

Keywords: electric vehicles, electric charging stations, distributed energy resources, power quality, electric mode, simulation modeling

Funding. The research was funded by the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (no. 075-03-2024-082-2).

For citation: Voronin V.A., Nepsha F.S. Voltage control in low-voltage distribution networks in the context of introducing home charging stations for electric vehicles. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):261-271. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-261-271. EDN: ZWSVER.

ВВЕДЕНИЕ

По данным информационно-аналитического агентства «Автостат», на конец 2023 г. парк легкового электротранспорта (ЭТ) России практически достиг отметки в 40 тыс. Средний годовой цепной темп роста за период 2018–2023 гг. составил 162,38%. При сохранении текущих темпов роста к концу 2030 г. количество ЭТ в России может превысить отметку в 1 млн шт. Однако более вероятно постепенное замедление темпов роста рынка ЭТ. При использовании среднемировых темпов роста в 145,51% (за период с 2010 по 2022 г. по данным IEA) для прогноза количества электромобилей в России к 2030 г. получено значение в 541 тыс. шт., что соответствует инерционному сценарию прогноза потребления электротранспортных средств в Российской Федерации согласно Концепции по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в РФ на период до 2030 года[3].

Вместе с развитием рынка ЭТ ожидается увеличение нагрузки на энергосистему. На основе данных «Автостат» о марочном составе парка электромобилей России на 2023 год[4], технических параметров электромобилей (по данным портала ev-database[5]) и данных о среднегодовом пробеге транспортных средств[6] авторами получена ориентировочная оценка годового электропотребления парка ЭТ России в 2030 г. порядка 1,35 млрд кВт·ч (при количестве ЭТ – 541 тыс. шт.), что составляет только 0,12% уровня годового потребления ЕЭС в 2023 г.

Согласно Концепции[3] сбалансированный сценарий развития инфраструктуры электрозарядных станций (ЭЗС) потребует наличия в количестве 10 электромобилей на 1 зарядный порт, 60% которых являются портами ЭЗС «медленного» типа. Тогда к 2030 г. электрозарядная инфраструктура может насчитывать порядка 54,1 тыс. зарядных портов. Если принять мощность зарядных портов «медленного» и «быстрого» типа, соответственно, 22 кВт и 50 кВт, то установленная мощность зарядной инфраструктуры будет порядка 2 ГВт, что составляет всего 1,25% пиковой мощности ЕЭС в 2023 г. С учетом коэффициента разновременности максимумов нагрузки [1] доля ЭЗС в пиковой мощности ЕЭС в 2030 г. может составлять всего порядка 0,25%.

[3]О концепции по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года от 23 августа 2021 - docs.cntd.ru. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/608396540 (дата обращения: 11.08.2023).
[4]Стали известны самые распространенные электромобили и гибриды в России. Режим доступа: https://www.autostat.ru/infographics/55682/ (дата обращения: 29.12.2023).
[5]EV Database. Режим доступа: https://ev-database.org/cheatsheet/energy-consumption-electric-car (дата обращения: 06.10.2023).
[6]Положение Банка России от 04.03.2021 № 755-П «О единой методике определения размера расходов на восстановительный ремонт в отношении поврежденного транспортного средства» (с изменениями и дополнениями) // ГАРАНТ. Режим доступа: https://base.garant.ru/400921665/ (дата обращения: 19.11.2023).

Таким образом, влияние электрозарядной инфраструктуры на ЕЭС в целом и электросетевой комплекс 35 кВ и выше в ближайшие годы окажется несущественным. Но в то же время ЭЗС могут значительно повлиять на пропускную способность и качество электроэнергии в распределительных сетях 0,4–10 кВ.

Отдельно следует отметить домашний заряд электромобилей. По данным «Автостат»[7], 64,3% владельцев ЭТ имеют домашнюю зарядную станцию. Максимум потребления ЭЗС, как правило, приходится на вечерние часы (время возвращения владельцев электромобилей с работы) и совпадает с максимумом потребления городских центров питания [2], что может привести к перегрузкам распределительных сетей 0,4–10 кВ и снижению качества электроэнергии. В работе [3] на основании результатов моделирования была показана высокая вероятность возникновения недопустимых отклонений напряжения в распределительной сети 10 кВ при наличии ЭЗС. В [4] показано, что при наличии зарядных станций у 60% потребителей низковольтной распределительной сети отклонения напряжения в среднем могут составлять порядка -9%, кратковременно достигая значений -20% и более.

Однако широкое распространение электромобилей является не только серьезным вызовом для существующих распределительных сетей, но и потенциальной возможностью использования инвертеров ЭТ для управления электрическими режимами, что позволит не только исключить негативные эффекты внедрения электрозарядной инфраструктуры, но и откроет новый инструмент для управления качеством электроэнергии. Как отмечается в работе [5], в настоящее время инверторы ЭЗС, как правило, работают при cosφ = 1. Однако инвертор способен как потреблять, так и генерировать реактивную мощность. В соответствии со стандартом IEEE 1547-2018 интеллектуальные инверторы распределенных энергетических ресурсов должны обладать возможностью участвовать в управлении напряжением распределительной сети. Регулирование напряжения инверторами возможно в четырех режимах: поддержание постоянного коэффициента мощности; cosφ-Ватт регулирование (поддержание коэффициента мощности в зависимости от величины активной мощности инвертора); вольт-вар регулирование; вольт-ватт регулирование.

Целью настоящей работы является исследование загрузки пригородных распределительных сетей 0,4 кВ при внедрении домашних зарядных станций электромобилей, а также оценка эффективности использования вольт-вар регулирования инвертеров ЭТ для ограничения отклонений напряжения.

Проблеме использования электромобилей для компенсации реактивной мощности (КРМ) посвящено множество работ. Например, в [6] показано, что КРМ с помощью ЭТ позволяет наиболее эффективно ограничивать провалы напряжения по сравнению с алгоритмами интеллектуального планирования очередности заряда ЭТ и V2G для распределительной сети среднего напряжения.

В [7] рассмотрен иерархический алгоритм оптимального регулирования напряжения и реактивной мощности в сети с помощью инвертеров ЭТ и солнечных панелей совместно с традиционными средствами управления. На основании результатов имитационного моделирования показано, что использование вольт-вар регулирования инвертерами ЭТ и солнечными панелями при оптимальной динамической настройке параметров вольт-вар характеристик позволяет снизить потери мощности и отклонения напряжения в распределительной сети.

В работе [8] рассмотрена разработка бортового зарядного устройства ЭТ с возможностью КРМ. Авторы отмечают, что разработанная система управления не создает дополнительных гармонических искажений, не оказывает негативного эффекта на срок службы батареи ЭТ и может быть использована для динамической КРМ.

В [9] рассмотрено использование медленных ЭЗС для компенсации реактивной мощности для разгрузки силового трансформатора. Судя по данным исследований авторов этого литературного источника, предложенный подход позволяет увеличить срок службы трансформатора примерно на 49%.

[7]Стало известно, где владельцы электромобилей их заряжают. Режим доступа: https://www.autostat.ru/infographics/56483/ (дата обращения: 30.12.2023).

В работе [10] показано, что участие ЭТ в КРМ позволяет снизить потери мощности в сети на 26,3%.

МЕТОДОЛОГИЯ

В качестве объекта исследования выбрана трансформаторная подстанция (ТП) 10/0,4 кВ и распределительная сеть 0,4 кВ. Потребителями ТП являются 114 частных жилых домов. Мощность трансформатора ТП составляет 400 кВ·А. Распределительная сеть 0,4 кВ представлена двумя фидерами (32 и 82 потребителя на каждом, соответственно), выполненными проводом марки А-35.

Для моделирования электропотребления частных жилых домов был использован открытый набор данных «The Individual Household Electric Power Consumption» (IHEPC) из UCI Machine Learning Repository, включающий в себя измерения активной и реактивной мощностей домохозяйства за период в четыре года с шагом в одну минуту. При моделировании суточного электропотребления для каждого жилого дома случайным образом выбирался суточный график из датасета IHEPC. Для приведения коэффициента загрузки распределительной сети к наблюдаемым значениям график потребления IHEPC умножался на корректирующий коэффициент. При подборе величины корректирующего коэффициента учитывалось, что средний коэффициент загрузки силовых трансформаторов 6(10)/0,4 кВ пригородных и сельских электрических сетей составляет порядка 18,8%, варьируясь в достаточно широких пределах от 2,9% до 38,6% по данным исследования [11].

Для моделирования поведения ЭТ использована имитационной модель, разработанная в среде AnyLogic, которая позволяет моделировать цикл суточного перемещения электромобилей в ГИС пространстве города, а также разряд и заряд их батарей. Подробное описание данной модели приведено в работе [12]. На рис. 1 показана суточная гистограмма моментов подключения и отключения ЭТ от ЭЗС, полученная по результатам моделирования в AnyLogic. При моделировании принято, что ЭТ ставятся на заряд в вечернее время при возвращении с работы, а снимаются с заряда в утренние часы. Чтобы учесть случайный характер зарядного поведения, постановка ЭТ на заряд по приезде в домашний район происходит с вероятностью, обратно пропорциональной текущему уровню заряда батареи ЭТ, но при уровне заряда ниже критического (принят равным 25% [13, 14]) вероятность составляет 100% [15].

Емкость батарей ЭТ принята равной 71 кВт·ч. При моделировании заряда ЭТ учитывалось изменение КПД заряда от 0,95 до 0,72 при снижении зарядного тока [16], а также зависимость зарядного тока от уровня заряда батареи (типовая кривая зарядного тока принята по данным работы [17]). Но-

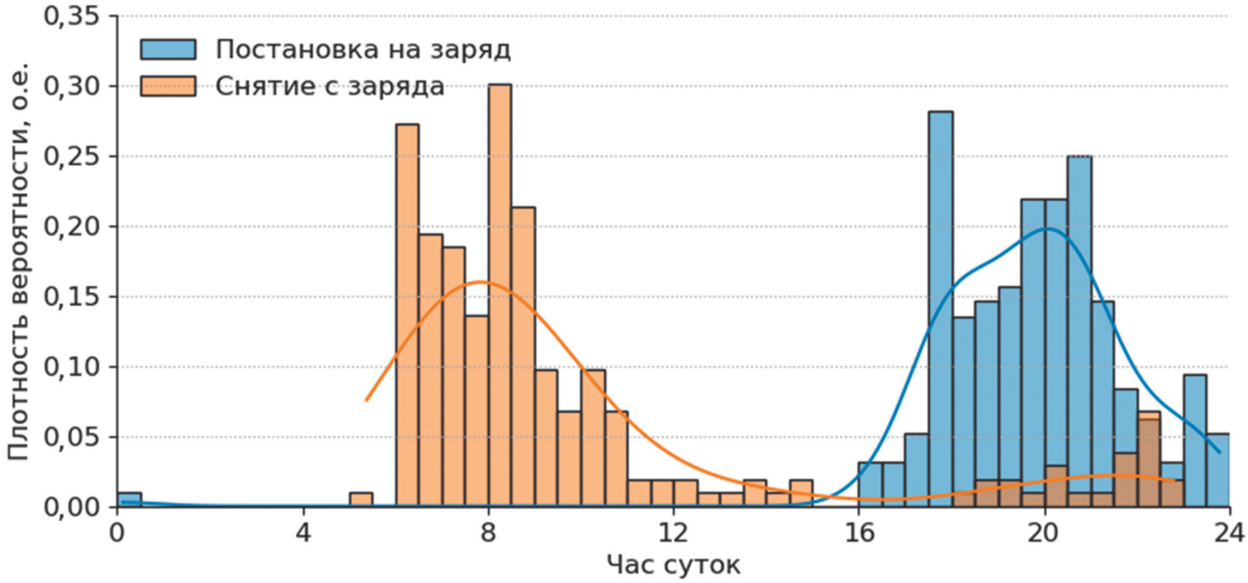


Рис. 1. *Гистограмма моментов постановки и снятия электротранспорта с заряда*
Fig. 1. *Histogram of the moments when electric vehicles arrive at the charging stations to be charged and depart from the charging stations*

минальная мощность домашней зарядной станции принята равной 3,3 кВт.

Моделирование электропотребления ЭЗС выполнено следующим образом: для каждого домохозяйства с ЭЗС определяется время постановки и снятие с заряда ЭТ (рис. 1) и начальный заряд батареи; если ЭТ подключено к ЭЗС, то величина зарядной мощности, потребляемой из сети, определяется номинальной мощностью домашней зарядной станции; при достижении уровня заряда батареи 100%-й заряд ЭТ завершается.

Для расчета электрического режима распределительной сети использовано стохастическое квазидинамическое моделирование несимметричного электрического режима. Расчеты выполнены на языке программирования Python с использованием библиотеки pandapower. При каждом прогоне модели выполняется расчет электрического режима в течение 24 ч с шагом в 15 мин. Для учета стохастического характера изменения электропотребления при каждом прогоне модели профили потребления жилых домов формируются случайным образом в соответствии с алгоритмом, описанным выше. Узлы подключения ЭЗС также выбираются случайным образом при каждом прогоне модели. Всего выполнено 25 прогонов модели.

Количество ЭЗС в распределительной сети определяется в соответствии с заданной долей внедрения ЭЗС, под которой понимается относительное количество домохозяйств, имеющих ЭЗС в рассматриваемой сети. В настоящей работе моделирование выполнено при доле внедрения ЭЗС в 10, 20 и 30%, что для рассматриваемого объекта соответствует 12, 23 и 34 домохозяйствам с ЭЗС из 114, соответственно.

Моделирование электрического режима рассмотрено для четырех вариантов:

а) при отсутствии ЭЗС;

б) при наличии ЭЗС без регулирования реактивной мощности;

в) при наличии ЭЗС с регулированием реактивной мощности;

г) при наличии ЭЗС с отложенным зарядом.

Для регулирования реактивной мощности с помощью инвертеров ЭТ рассмотрен локальный метод управления, при котором величина реактивной мощности инвертора определяется на основании вольт-вар характеристики. Ограничение отрицательных отклонений напряжения при использовании вольт-вар регулирования достигается как за счет выдачи в сеть реактивной мощности инвертером ЭТ, так и за счет ограничения активной мощности заряда (для исключения

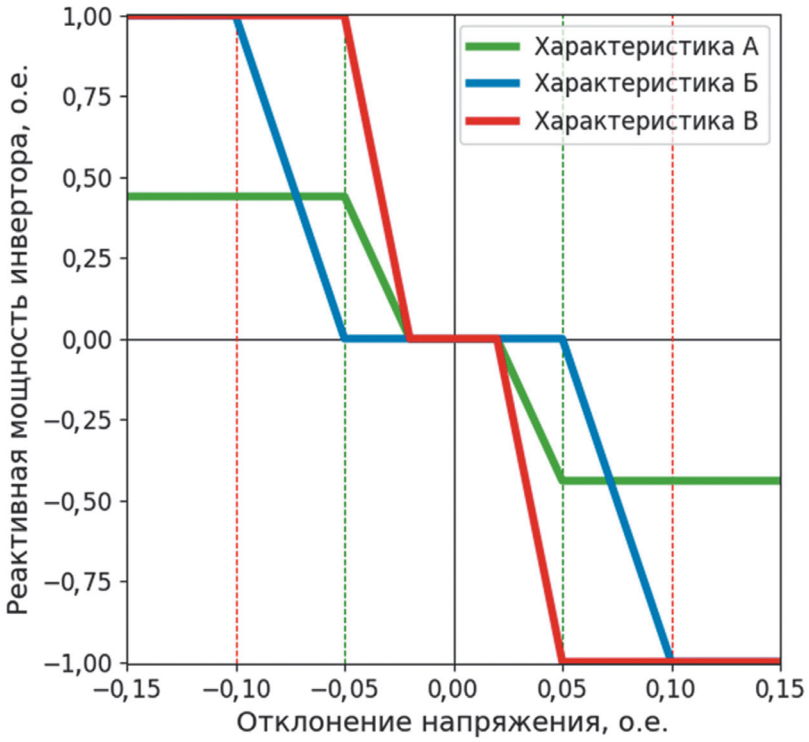


Рис. 2. *Вольт-вар характеристики инверторов электротранспорта*
Fig. 2. *Volt-Var characteristics of electric transport inverters*

перегрузки инвертора). Моделирование выполнено для трех вариантов вольт-вар характеристики (рис. 2):

– характеристика А имеет следующие параметры: мертвая зона при δ*U* от -2 до +2%; максимум реактивной мощности при δ*U* в ±5%; максимальная реактивная мощность составляет 44% номинальной полной мощности инвертора, что соответствует минимальным требованиям к инверторам категории В согласно IEEE 1547-2018;

– характеристика Б: мертвая зона при δ*U* от -5 до +5%; максимум реактивной мощности при δ*U* в ±10%; максимальная реактивная мощность составляет 100% номинальной полной мощности инвертора;

– характеристика В аналогична характеристике А, но с максимальной реактивной мощностью в 100% номинальной полной мощности инвертора.

Для моделирования отложенного заряда ЭТ принято допущение, что владельцы ЭТ планируют заряд таким образом, чтобы он происходил в ночную зону суток согласно интервалам тарифных зон суток для населения, оплачивающих электроэнергию по дифференцированным тарифам. В настоящей работе ночная зона суток принята с 23:00 до 07:00.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 3 приведена схема моделируемой распределительной сети, цветовым градиентом показан уровень напряжения и загрузка ветвей в часы максимума потребления при доле внедрения ЭЗС – 30% (на схеме показаны положения только тех ЭЗС, которые потребляют мощность в рассматриваемом шаге моделирования).

Загрузка трансформатора ТП и головного участка воздушной линии (Ф-1 0,4 кВ) исследуемой распределительной сети показана на рис. 4. На графиках приведены распределения коэффициентов загрузки электросетевого оборудования в течение суток, усредненные по всем прогонам модели. Числами отмечены средние максимумы загрузки для рассмотренных вариантов управления зарядом.

На рис. 5 приведены профили изменения напряжения в сети 0,4 кВ от ТП до наиболее удаленного потребителя. На графиках показаны значения среднего минимума напряжения, полученные усреднением по всем прогонам модели.

На рис. 6 показана относительная продолжительность отрицательных отклонений напряжения ниже -5% и -10%, соответственно, в интервале моделирования (1 день) на выводах наиболее удаленного потребителя.

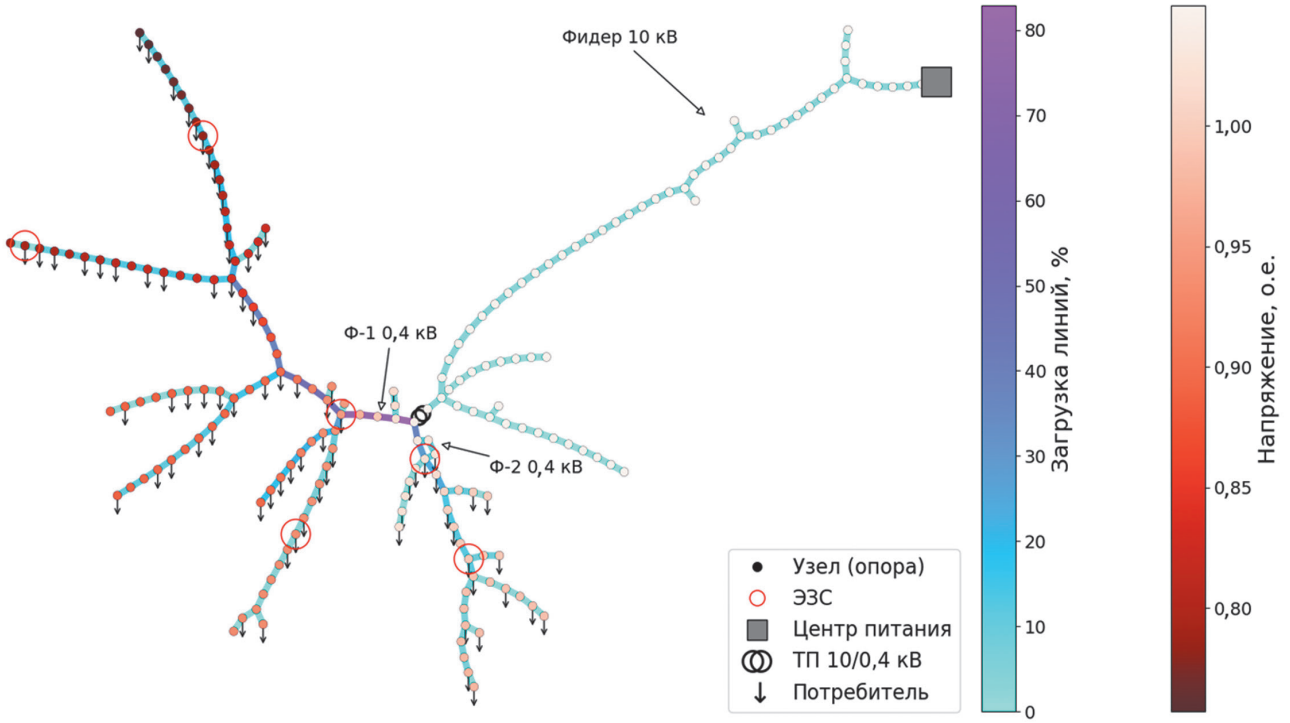


Рис. 3. *Расчетная схема распределительной сети*
Fig. 3. *Distribution network design diagram*

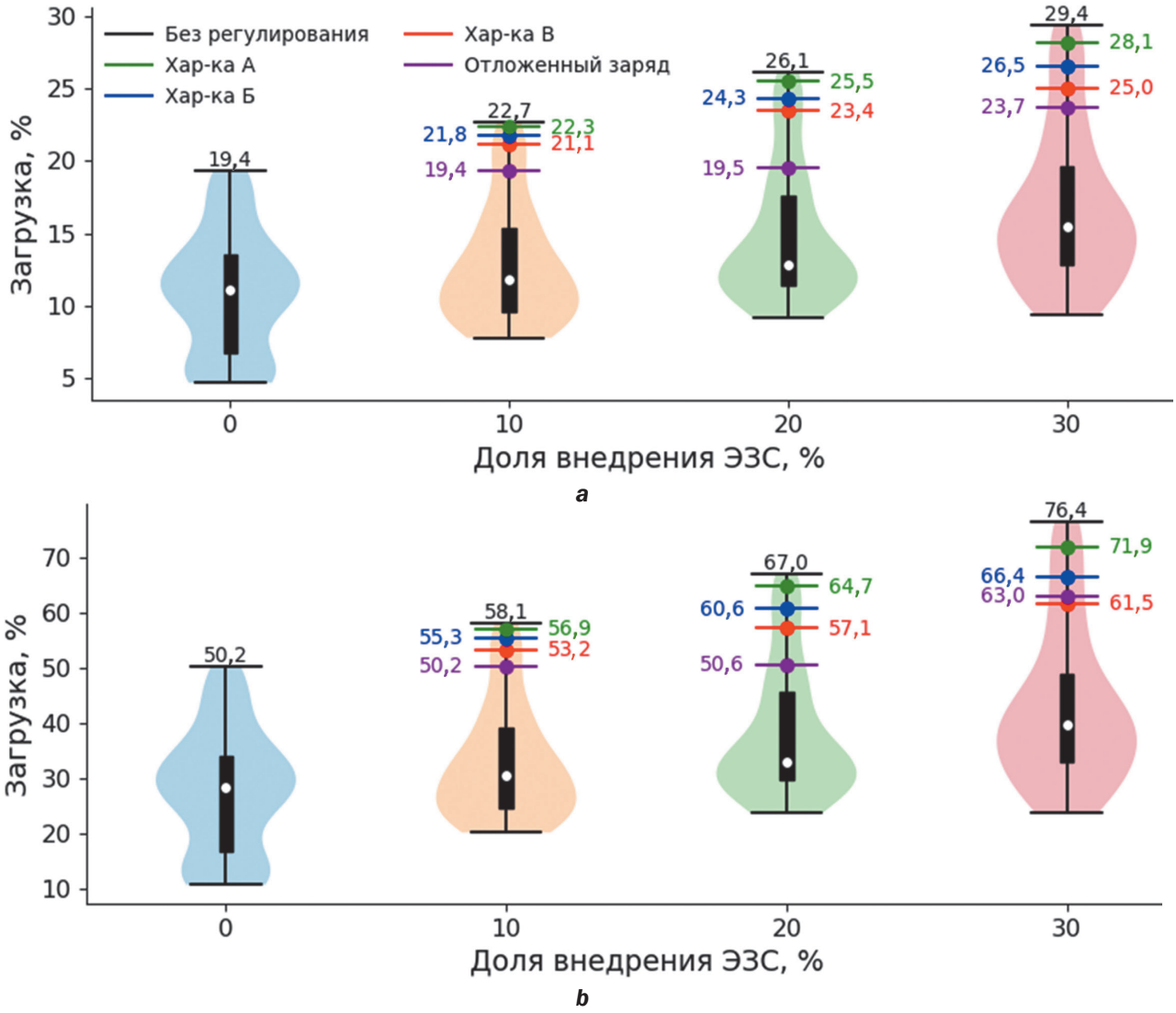


Рис. 4. *Загрузка элементов моделируемой распределительной сети: a – трансформатора; b – головного участка воздушной линии (Ф-1 0,4 кВ)*
Fig. 4. *Loading elements of the simulated distribution network: a) transformer; b) head section of the overhead line (F-1 0.4 kV)*

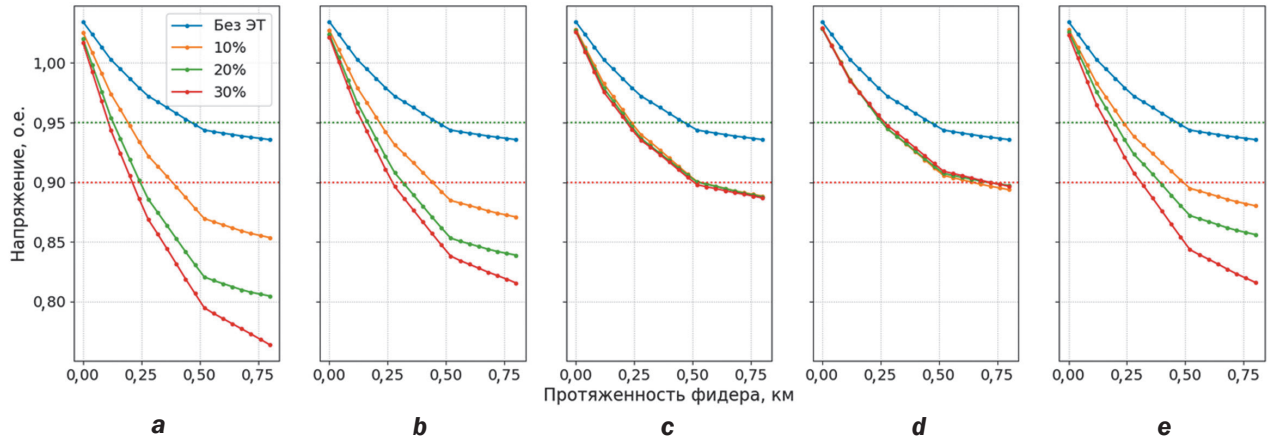


Рис. 5. *Профили изменения напряжения в моделируемой распределительной сети: a – без регулирования; b – характеристика А; c – характеристика Б; d – характеристика В; e – отложенный заряд*
Fig. 5. *Voltage change profiles in the simulated distribution network: a – control free; b – characteristic A; c – characteristic Б; d – characteristic B; e – delayed charge*

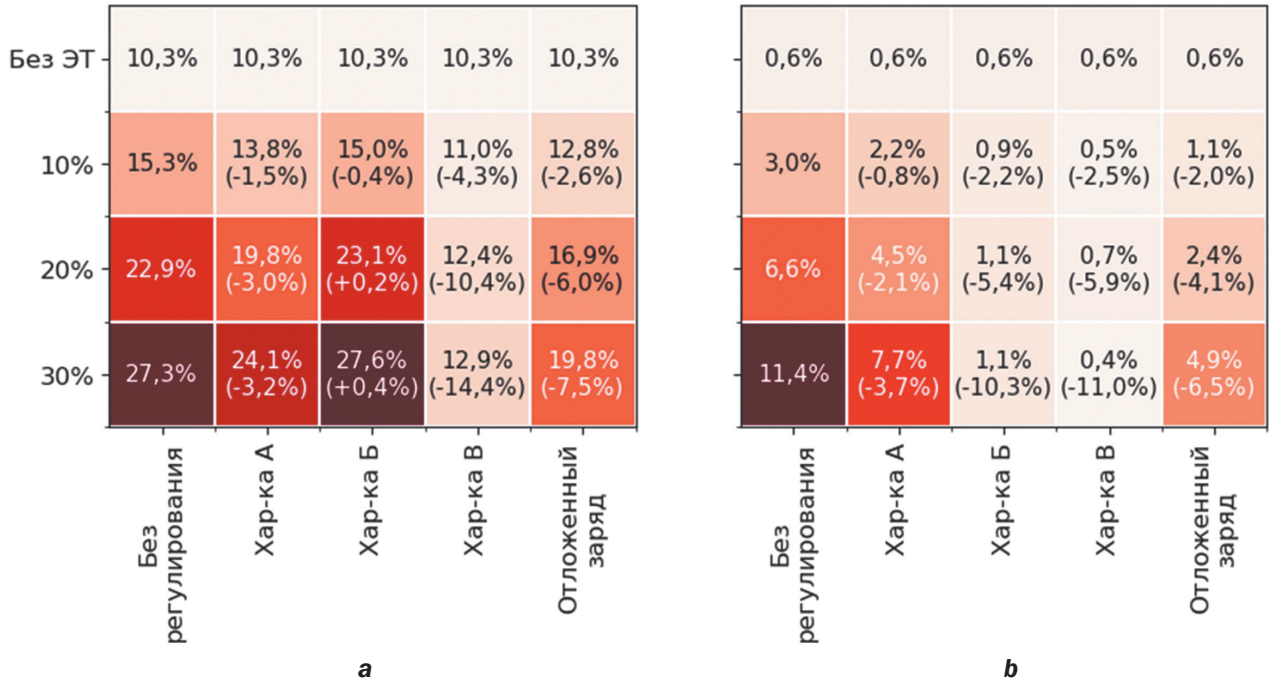


Рис. 6. *Относительная продолжительность отклонений напряжения ниже -5% (a) и -10% (b)*
Fig. 6. *Relative duration of voltage deviations below -5% (a) and -10% (b)*

Среднее отклонение уровня заряда ЭТ при реализации рассмотренных методов управления зарядом составило:

а) -0,28% при вольт-вар регулировании по характеристике А;

б) -0,49% при вольт-вар регулировании по характеристике Б;

в) -1,29% при вольт-вар регулировании по характеристике В;

г) -8,00% при отложенном заряде.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как следует из полученных результатов расчета, домашние зарядные станции оказывают значительное влияние на загрузку и качество электроэнергии в распределительной сети 0,4 кВ. Согласно приказу Министерства энергетики РФ от 28.08.2023 № 690[8] в сетях 35 кВ и ниже напряжение в точках присоединения к электрической сети потребителей в части отклонений напряжения определяется п. 136 Правил технологического функционирования электроэнергетических систем[9], а именно должно находится в диапазоне ±5% в течение не менее 95% времени интервала в 24 ч и не должно выходить за границы в ±10%. Недопустимые отрицательные отклонения напряжения у наиболее удаленного потребителя даже при отсутствии заряда ЭТ (см. рис. 6, «Без ЭТ») обусловлены исчерпанием возможностей традиционных средств регулирования напряжения (переключение без возбуждения трансформаторов ТП, регулировка переключения под напряжением трансформаторов центра питания). Проблема отклонений напряжения в пригородных и сельских сетях 0,4 кВ отмечается многими авторами (например, в работах [18, 19]), а появление домашних ЭЗС в таких сетях может существенно усугубить данную проблему.

Уже при доле ЭЗС в 10% продолжительность отклонений напряжения ниже -10% увеличивается до 3%, а при доле в 30% до 11,4% интервала моделирования в 1 день (см. рис. 6).

Наиболее «слабым» элементом распределительной сети оказались воздушные ли-

[8]Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 28.08.2023 № 690 «Об утверждении требований к качеству электрической энергии, в том числе распределению обязанностей по его обеспечению между субъектами электроэнергетики и потребителями электрической энергии».
[9]Постановление Правительства РФ от 13.08.2018 № 937 (ред. от 31.01.2024) «Об утверждении Правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации».

нии 0,4 кВ, средний максимум загрузки которых возрастает до 76,4% при доле ЭЗС в 30% при загрузке трансформатора в 29,4% (см. рис. 4).

Отложенный заряд является достаточно эффективным способом ограничения загрузки электросетевого оборудования. Как следует из рис. 4, смещение времени заряда ЭТ на 23:00 позволяет практически полностью устранить рост среднего максимума загрузки линий и трансформатора при доле ЭЗС до 20% и значительно ограничить средний максимум загрузки при доле ЭЗС в 30%. Однако отложенный заряд показал меньшую эффективность в снижении отклонений напряжения. При доле ЭЗС в 30% отложенный заряд позволяет в среднем снизить длительность отклонений напряжения ниже -5% и -10% на 7,5 и 6,5% соответственно (см. рис. 6).

Вольт-вар регулирование напряжения инверторами позволяет существенно снизить отклонения напряжения в распределительной сети. Из трех рассмотренных характеристик наилучший результат был получен для варианта В. При доле ЭЗС в 30% среднее снижение длительности отклонений напряжения ниже -5% и -10% составило 14,4% и 11,0% соответственно (в 1,8 раз больше отложенного заряда). Характеристика Б имеет сопоставимый эффект с характеристикой А в сокращении продолжительности отклонений напряжения ниже -10%, но не позволяет устранить отклонения напряжения ниже -5%. Характеристика А за счет ограниченного максимума реактивной мощности инвертора показала в 3-4 раза худшие результаты по сравнению с характеристикой В.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что существующие сети 0,4 кВ пригородов могут не иметь достаточного запаса по пропускной способности для широкого внедрения домашних зарядных станций электромобилей, что может привести к недопустимым отрицательным отклонениям напряжения. Смещение заряда ЭТ на ночные часы только частично решает данную проблему и приводит к «недозаряду» батарей ЭТ за счет ограничения длительности заряда. Использование инверторов ЭТ для компенсации реактивной мощности при соответствующем подборе вольт-вар характеристики позволяет в существенной степени сократить продолжительность отрицательных отклонений напряжения и средний максимум загрузки распределительной сети. Рассматриваемая система управления инвертором является локальной и поэтому не требует наличия единого контроллера и системы связи. Простота реализации является важным преимуществом при организации управления зарядом ЭТ на домашних зарядных станциях в частных домах. В связи с этим, по мнению авторов, реализация вольт-вар регулирования напряжения инверторами ЭТ является наиболее рациональным способом повышения качества электроэнергии в распределительных сетях пригородов.

Вместе с тем при управлении крупными зарядными хабами или большим количеством маломощных зарядных станций, расположенных в непосредственной близости (например, подземный паркинг в жилом комплексе), может оказаться целесообразной реализация централизованных и децентрализованных систем управления зарядом с контролем загрузки силового трансформатора и ограничением зарядной мощности ЭЗС при возникновении риска перегрузки электросетевого оборудования, что может позволить решить проблему с недостатком свободной мощности для технологического присоединения ЭЗС [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрена проблема влияния домашних зарядных станций электромобилей на загрузку и отклонения напряжения в пригородной распределительной сети 0,4 кВ. На основании результатов квазидинамического моделирования несимметричного электрического режима установлено, что при увеличении количества потребителей с ЭЗС на 1% средний максимум загрузки силового трансформатора ТП повышается в среднем на 0,33%, а головного участка воздушной линии на 0,83%. При этом время отрицательных отклонений напряжения ниже -10% может достигать 11,4% интервала моделирования в 1 день.

На основании сравнительного анализа рассмотренных мероприятий по управле-

нию зарядом ЭТ выявлено, что наиболее эффективным способом ограничения отрицательных отклонений напряжения является вольт-вар регулирование инверторов бортовых зарядных устройств ЭТ. В работе показано, что при использовании вольт-вар характеристики по типу B (см. рис. 2) удается в существенной степени снизить продолжительность отрицательных отклонений напряжения и средний максимум загрузки распределительной сети.

Полученные результаты могут быть использованы при перспективном планировании развития распределительных электрических сетей в условиях широкого распространения электромобилей.

Список источников

1. Hecht C., Figgener J., Sauer D.U. Simultaneity factors of public electric vehicle charging stations based on real-world occupation data // World Electric Vehicle Journal. 2022. Vol. 13. Iss. 7. P. 129. https://doi.org/10.3390/wevj13070129.
2. Hecht C., Figgener J., Li Xiaohui, Zhang Lei, Sauer D.U. Standard load profiles for electric vehicle charging stations in Germany based on representative, empirical data // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 6. P. 2619. https://doi.org/10.3390/en16062619.
3. Шкитина Н., Акимов Д. Анализ влияния стохастической нагрузки электромобилей на распределительную сеть // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № S1. С. 40–45. EDN: GZMBRZ.
4. Ahmed S.I., Salehfar H., Selvaraj D.F. Impact of electric vehicle charging on the performance of distribution grid // IEEE 12th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. 2021. https://doi.org/10.1109/PEDG51384.2021.9494268.
5. Wang Shengyi, Du Liang, Li Yan. Decentralized Volt/Var control of EV charging station inverters for voltage regulation // IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (Chicago, Illinois, 23–26 June 2020). Chicago: IEEE, 2020. P. 604–608. https://doi.org/10.1109/ITEC48692.2020.9161713.
6. Mukherjee B., Kariniotakis G., Sossan F. Smart charging, vehicle-to-grid, and reactive power support from electric vehicles in distribution grids: a performance comparison // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. 2021. https://doi.org/10.1109/ISGTEurope52324.2021.9639954.
7. Prabawa P., Choi Dae-Hyun. Hierarchical volt-var optimization framework considering voltage control of smart electric vehicle charging stations under uncertainty // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 123398–123413. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3109621.
8. Kisacikoglu M.C., Kesler M., Tolbert L.M. Single-phase on-board bidirectional PEV charger for V2G reactive power operation // IEEE Transactions on Smart Grid. 2015. Vol. 6. Iss. 2. P. 767–775. https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2360685.
9. Jain A., Karimi-Ghartemani M. Mitigating adverse impacts of increased electric vehicle charging on distribution transformers // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 23. P. 9023. https://doi.org/10.3390/en15239023.
10. Singh J., Tiwari R. Electric vehicles reactive power management and reconfiguration of distribution system to minimise losses // IET Generation, Transmission & Distribution. 2020. Vol. 14. Iss. 25. P. 6285–6293. https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2020.0375.
11. Наумов И.В., Карамов Д.Н., Третьяков А.Н., Якупова М.А., Федоринова Э.С. Исследование загрузки силовых трансформаторов в системах сельского электроснабжения // Надежность и безопасность энергетики. 2021. Т. 13. № 4. С. 282–289. https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-4-282-289. EDN: VAWHEZ.
12. Воронин В.А., Непша Ф.С. Мультиагентное моделирование развития электрозарядной инфраструктуры города Кемерово // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № 3. С. 10–17. EDN: XVUSOW.
13. Xing Qiang, Chen Zhong, Zhang Ziqi, Wang Ruisheng, Zhang Tian. Modelling driving and charging behaviours of electric vehicles using a data-driven approach combined with behavioural economics theory // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 324. P. 129243. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129243.
14. Franke T., Krems J.F. Understanding charging behaviour of electric vehicle users // Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour. 2013. Vol. 21. P. 75–89. https://doi.org/10.1016/j.trf.2013.09.002.
15. Tan Jiyuan, Liu Fuyu, Xie Na, Guo Weiwei, Wu Wenxiang. Dynamic pricing strategy of charging station based on traffic assignment simulation // Sustainability. 2022. Vol. 14. Iss. 21. P. 14476. https://doi.org/10.3390/su142114476.
16. Dahmane Y., Chenouard R., Ghanes M., Ruiz M.A. Optimal electric vehicle fleet charging management with a frequency regulation service // World Electric Vehicle Journal. 2023. Vol. 14. Iss. 6. P. 152. https://doi.org/10.3390/wevj14060152.
17. Leemput N., Geth F., Roy Juan Van, Olivella-Rosell P., Driesen J., Sumper A. MV and LV residential grid impact of combined slow and fast charging of electric vehicles // Energies. 2015. Vol. 8. Iss. 3. P. 1760–1783. https://doi.org/10.3390/en8031760.
18. Бородин М.В., Виноградов А.В., Голиков И.О., Лансберг А.А. Анализ показателей качества электроэнергии в распределительных электрических сетях 0,4 кВ и причин жалоб потребителей в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» // Научный журнал молодых ученых. 2022. № 3. С. 72–80.

19. Бухвал А.В., Юндин М.А. Анализ показателей качества электроэнергии в точках её передачи на напряжении 0,22 кВ // Вестник аграрной науки Дона. 2021. № 1. С. 51–58. EDN: XVOODS.
20. Voronin V.A., Nepsha F.S. Analysis of the efficiency of electric vehicle charging control in urban distribution grids // Belarusian-Ural-Siberian Smart Energy Conference. 2023. P. 109–114. https://doi.org/10.1109/BUSSEC59406.2023.10296435.

References

1. Hecht C., Figgener J., Sauer D.U. Simultaneity factors of public electric vehicle charging stations based on real-world occupation data. *World Electric Vehicle Journal*. 2022;13(7):129. https://doi.org/10.3390/wevj13070129.
2. Hecht C., Figgener J., Li Xiaohui, Zhang Lei, Sauer D.U. Standard load profiles for electric vehicle charging stations in Germany based on representative, empirical data. *Energies.* 2023;16(6):2619. https://doi.org/10.3390/en16062619.
3. Shkitina N., Akimov D. Analysis of electric vehicle stochastic load effect on distribution network. *Electric Power. Transmission and distribution*. 2021;S1:40-45. (In Russ.). EDN: GZMBRZ.
4. Ahmed S.I., Salehfar H., Selvaraj D.F. Impact of electric vehicle charging on the performance of distribution grid. In: *IEEE 12th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*. 2021. https://doi.org/10.1109/PEDG51384.2021.9494268.
5. Wang Shengyi, Du Liang, Li Yan. Decentralized Volt/Var control of EV charging station inverters for voltage regulation. In: *IEEE Transportation Electrification Conference & Expo.* 23–26 June 2020, Chicago, IL. Chicago: IEEE; 2020, p. 604-608. https://doi.org/10.1109/ITEC48692.2020.9161713.
6. Mukherjee B., Kariniotakis G., Sossan F. Smart charging, vehicle-to-grid, and reactive power support from electric vehicles in distribution grids: a performance comparison. In: *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*. 2021. https://doi.org/10.1109/ISGTEurope52324.2021.9639954.
7. Prabawa P., Choi Dae-Hyun. Hierarchical volt-var optimization framework considering voltage control of smart electric vehicle charging stations under uncertainty. *IEEE Access*. 2021;9:123398-123413. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3109621.
8. Kisacikoglu M.C., Kesler M., Tolbert L.M. Single-phase on-board bidirectional PEV charger for V2G reactive power operation. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015;6(2):767-775. https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2360685.
9. Jain A., Karimi-Ghartemani M. Mitigating adverse impacts of increased electric vehicle charging on distribution transformers. *Energies*. 2022;15(23):9023. https://doi.org/10.3390/en15239023.
10. Singh J., Tiwari R. Electric vehicles reactive power management and reconfiguration of distribution system to minimise losses. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2020;14(25):6285-6293. https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2020.0375.
11. Naumov I.V., Karamov D.N., Tretyakov A.N., Yakupova M.A., Fedorinova E.S. Study of power transformer loading in rural power supply systems. *Safety & Reliability of Power Industry*. 2020;13(4):282-289. (In Russ.). https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-4-282-289. EDN: VAWHEZ.
12. Voronin V.A., Nepsha F.S. Multi-agent modeling of electric charging infrastructure development in the city of Kemerovo. *Electric Power. Transmission and distribution*. 2023;3:10-17. (In Russ.). EDN: XVUSOW.
13. Xing Qiang, Chen Zhong, Zhang Ziqi, Wang Ruisheng, Zhang Tian. Modelling driving and charging behaviours of electric vehicles using a data-driven approach combined with behavioural economics theory. *Journal of Cleaner Production*. 2021;324:129243. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129243.
14. Franke T., Krems J.F. Understanding charging behaviour of electric vehicle users. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2013;21:75-89. https://doi.org/10.1016/j.trf.2013.09.002.
15. Tan Jiyuan, Liu Fuyu, Xie Na, Guo Weiwei, Wu Wenxiang. Dynamic pricing strategy of charging station based on traffic assignment simulation. *Sustainability.* 2022;14(21):14476. https://doi.org/10.3390/su142114476.
16. Dahmane Y., Chenouard R., Ghanes M., Ruiz M.A. Optimal electric vehicle fleet charging management with a frequency regulation service. *World Electric Vehicle Journal*. 2023;14(6):152. https://doi.org/10.3390/wevj14060152.
17. Leemput N., Geth F., Roy Juan Van, Olivella-Rosell P., Driesen J., Sumper A. MV and LV residential grid impact of combined slow and fast charging of electric vehicles. *Energies.* 2015;8(3):1760-1783. https://doi.org/10.3390/en8031760.
18. Borodin M.V., Vinogradov A.V., Golikov I.O., Lansberg A.A. Analysis of electricity quality indicators in 0.4 kV distribution electrical networks and the reasons for consumer complaints in the branch of PJSC Rosseti Center – Orelenergo. *Nauchnyj zhurnal molodyh uchenyh*. 2022;3:72-80. (In Russ.).
19. Bukhval A.V., Yundin M.A. Analysis of some quality indicators electricity in the network 0.22 kV. *Don agrarian science bulletin*. 2021;1:51-58. (In Russ.). EDN: XVOODS.
20. Voronin V.A., Nepsha F.S. Analysis of the efficiency of electric vehicle charging control in urban distribution grids. In: *Belarusian-Ural-Siberian Smart Energy Conference*. 2023;109-114. https://doi.org/10.1109/BUSSEC59406.2023.10296435.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Воронин Вячеслав Андреевич,
к.т.н.,
старший научный сотрудник
Научно-исследовательской
лаборатории цифровой трансформации
предприятий минерально-сырьевого комплекса,
доцент кафедры электроснабжения горных
и промышленных предприятий,
Кузбасский государственный технический
университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия
✉ voroninva@kuzstu.ru
https://orcid.org/0000-0002-7242-9100

Непша Федор Сергеевич,
к.т.н.,
ведущий специалист Технической дирекции,
ООО «РТСофт – СГ»,
105264, г. Москва, ул. Верхняя Первомайская,
51, Россия;
старший научный сотрудник
Научно-исследовательской
лаборатории цифровой трансформации
предприятий минерально-сырьевого комплекса,
Кузбасский государственный технический
университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия
nepsha_fs@rtsoft.ru; nepshafs@gmail.com;
nepshafs@kuzstu.ru
https://orcid.org/0000-0002-7468-2548

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vyacheslav A. Voronin,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher at the Mining Industry
Digital Transformation Laboratory,
Associate Professor of the Department of Power
Supply of Mining and Industrial Enterprises,
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28 Vesennaya St., Kemerovo 650000, Russia
✉ voroninva@kuzstu.ru
https://orcid.org/0000-0002-7242-9100

Fedor S. Nepsha,
Cand. Sci. (Eng.),
Leading Specialist of the Technical Directorate,
LLC “RTSoft – SG”,
51 Verkhnyaya Pervomayskaya St., Moscow
105264, Russia,
Senior Researcher at the Mining Industry
Digital Transformation Laboratory,
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28 Vesennaya St., Kemerovo 650000, Russia
nepsha_fs@rtsoft.ru; nepshafs@gmail.com;
nepshafs@kuzstu.ru
https://orcid.org/0000-0002-7468-2548

Вклад авторов

Воронин В.А. – выполнение расчетов и анализ результатов, написание основного текста статьи. Непша Ф.С. – научное руководство, редактура.

Contribution of the authors

Voronin V.A. performed calculations and analyzed the research results, wrote the main text of the article. Nepsha F.S. performed scientific supervision and edited the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 05.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 06.05.2024 г.; принята к публикации 12.05.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 05.04.2024; approved after reviewing 06.05.2024; accepted for publication 12.05.2024.

iPolytech Journal 2024. Т. 28. № 2. 273-289 ISSN 2782-4004 (print)
2024;28(2):273-289 ISSN 2782-6341 (online)

ЭНЕРГЕТИКА

Обзорная статья
УДК 658.261
EDN: QFANFX
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-273-289

Анализ учета критериев системной надёжности в моделях выбора состава включенного генерирующего оборудования в электроэнергетических системах

Ю.Э. Добрынина[1]✉, Д.С. Крупенёв[2]

[1,2]Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия

Резюме. Цель исследования – выполнить анализ моделей и механизмов выбора состава включенного генерирующего оборудования, которые используются в работе оптового рынка электроэнергии и мощности в России и других странах, а также рассмотреть методы и критерии учета ограничений по системной надежности в этих моделях. Объектом исследования выступают энергетические системы: оптовые рынки электроэнергии и мощности в России, Великобритании, странах Европейского союза, Австралии и Соединенных Штатах Америки. В основу исследований легли подход, сбор и проведение аналитического обзора различных источников научной информации. Рассмотрены основные положения функционирования оптового рынка электроэнергии и мощности в различных странах, основные механизмы регулирования процессов в рамках решения оптимизационной задачи выбора состава включенного генерирующего оборудования, изучена и проанализирована нормативно-правовая база, основы регулирования в области решения оптимизационных задач. Показано, что в рамках функционирования отечественной модели АО «Системный оператор Единой энергосистемы России» проводит выбор состава включенного генерирующего оборудования в рамках поданных ценовых заявок с учетом потребности рынка и баланса энергосистемы. Рассмотренная и проанализированная действующая система выбора состава включенного генерирующего оборудования, принятая в российской электроэнергетике, не позволяет в полной мере учитывать системную надежность, что способствует дальнейшему изучению данного вопроса. Проведенный сравнительный анализ принципов функционирования моделей и особенностей решения оптимизационных задач по выбору состава включенного генерирующего оборудования показал сильные и слабые стороны в подходах в различных странах как с точки зрения законодательства, так и с модельной стороны. По итогам проведенных аналитических исследований сформулированы основные положения по каждой модели, посредством которых решается оптимизационная задача выбора состава включенного генерирующего оборудования.

Ключевые слова: оптовый рынок электроэнергии и мощности, энергетическая система, выбор состава включенного генерирующего оборудования, системная надежность

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0003) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг.

Для цитирования: Добрынина Ю.Э., Крупенёв Д.С. Анализ учёта критериев системной надёжности в моделях выбора состава включенного генерирующего оборудования в электроэнергетических системах // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 273–289. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-273-289. EDN: QFANFX.

POWER ENGINEERING

Review article

Consideration of system security criteria in the models of power system unit commitment

Yulia E. Dobrynina[1]✉, Dmitry S. Krupenev[2]

[1,2]Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. The study aims to analyze the unit commitment models and mechanisms that are used in the wholesale electricity and capacity market in Russia and other countries, as well as to consider the methods and criteria for taking into account the system security constraints in these models. The subject matter of the study includes energy systems: wholesale energy and capacity markets in Russia, the United Kingdom, EU countries, Australia, and the United States of America. In this work, various scientific information sources were collected and

© Добрынина Ю.Э., Крупенёв Д.С., 2024

analytically reviewed. The study considers the performance framework of the wholesale electricity and capacity market in different countries and the main control mechanisms in solving the unit commitment problem, as well as studying and analyzing the legal and regulatory framework in solving optimization problems. It is shown that within the domestic model, the Russian Power System Operator conducts unit commitment according to the submitted price bids, taking into account the needs of the market and the energy system balance. The considered and analyzed unit commitment scheme adopted in the Russian electric power industry fails to take full account of system security, which prompts further study of this issue. The performed comparative analysis of principles underlying the performance of models and the specifics of solving unit commitment problems revealed the strengths and weaknesses in the approaches adopted in different countries both in terms of the legislation and models. The conducted analytical study helped to formulate the key points for each model that can be used to solve the unit commitment problem.

Keywords: wholesale electricity and capacity market, power system, selection of included generating equipment composition, system reliability

Funding. The work was conducted under the State Assignment Project (no. FWEU-2021-0003), which is a part of the Fundamental Research Program of the Russian Federation for the period from 2021 to 2030.

For citation: Dobrynina Y.E., Krupenev D.S. Consideration of system security criteria in the models of power system unit commitment. *iPolytech Journal.* 2024;28(2):273-289. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-273-289. EDN: QFANFX.

ВВЕДЕНИЕ

В современных реалиях регулирование оптового рынка электроэнергии и мощности не стоит на месте, постоянно меняющиеся вводные (внешние и внутренние факторы) способствуют развитию. Подход к решению оптимизационной задачи по выбору состава включенного генерирующего оборудования (ВСВГО) позволяет найти пути решения в «узких» местах.

В Российской Федерации оптовый рынок электроэнергии и мощности (ОРЭМ) подразделяется на рынок электрической энергии, рынок мощности и рынок системных услуг. Рынок электрической энергии включает в себя: балансирующий рынок (БР), рынок на сутки вперед (РСВ), свободные и двусторонние договоры[1-10]. Стоит отметить, что соотношение продаваемой энергии в России на представленных рынках составляет (данные за 2021 год):

– 1-я ценовая зона порядка 74,7% – РСВ; 17,1 – регулируемые договоры (РД); 5,1% – БР; 3,1% – свободные двусторонние договоры;

– 2-я ценовая зоны – 70,4% – РСВ; 9,6% – РД; 4,3% – БР; 15,7% – свободные двусторонние договоры.

Модель ВСВГО применяется в рамках работы РСВ. Согласно нормативным документам, в области электроэнергетики процедура ВСВГО базируется преимущественно на экономических параметрах с некоторыми техническими ограничениями (в основном это возможности генераторов по выдаче мощности). В рамках данной работы проведен анализ существующей модели ВСВГО на ОРЭМ и сформулированы требования (направления) по улучшению выборного процесса.

Модель ВСВГО призвана покрыть существующие издержки генераторов с максимизацией маржинальной прибыли, при этом осуществить отбор генераторов максимально прозрачно.

В модели ВСВГО используется ряд ограничений, своего рода критерии для решения оптимизационной задачи, которые призваны структурировать выбор, далее рассмотрим более детально.

Модель ВСВГО важна как оптимизационная задача, направленная на решение вопросов работы энергосистемы, а также необходимая составляющая системной надежности Единой энергетической системы (ЕЭС) России. В контексте сформулированной задачи целесообразно рассмотреть действующие критерии, оказывающие влияние на конечную заявку ВСВГО и процедуру отбора.

В современных реалиях большое внимание уделяется технико-экономическим параметрам, где основой для расчетов берется максимизация прибыли через отбор наиболее выгодной заявки для генератора с учетом поведения конкурентов и технических особенностей оборудования. Оптимизационная задача с точки зрения генератора состоит в следующем: необходимо сформировать почасовую заявку таким образом, чтобы она покрывала затраты на производство с учетом маржинальной прибыли; учесть поведение конкурентов (создать конкурентную заявку для отбора); взять во внимание технические возможности оборудования (тип/вид обору-

дования, график проведения ремонтных работ, технические ограничения, время разворота оборудования и другие параметры).

Оптимизационная задача со стороны системного администратора заключается в осуществлении процедуры отбора ВСВГО в одноименной модели с учетом ограничений как технических, так и экономических.

В контексте этой работы основными задачами являются анализ процедур ВСВГО, применяемые в разных странах, формулирование предложений, которые позволят скорректировать решение оптимизационной задачи с учетом системной надежности в модели ВСВГО. В частности, как одно из направлений – «отсутствие ограничения энергопотребления; перегрузки оборудования электростанций, подстанций и линий электропередачи выше заданных в блоке настройки; недопустим перенос перегрузки»[3].

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ

ОРЭМ [3] в России представляет собой механизм взаимодействия ряда субъектов, а именно РСВ, БР, свободные и двусторонние договоры. Электрическая энергия в пределах ценовых зон ОРЭМ может продаваться по регулируемым ценам в рамках регулируемых договоров и по конкурентным (нерегулируемым) ценам на ОРЭМ.

Процедура ВСВГО подразумевает наличие оборудования, находящегося в резерве. Рассмотрим их более детально на основании стандарта[3], рис. 1.

На всех этапах краткосрочного планирования должна осуществляться оценка достаточности объема РТР в каждой области регулирования с учетом определения объема невыпускаемых резервов. Фактический объем РТР определяется для каждой области регулирования, в которой производится регулирование частоты. При определении фактического объема РТР осуществляется оценка достаточности объема РТР с учетом определения объема невыпускаемых резервов[4].

В соответствии с приведенной выше информацией, решение оптимизационной задачи ВСВГО подразумевает наличие резерва, а именно третичного резерва мощности (с учетом территориальных особенностей в ЕЭС России)[4].

Системный оператор (СО) аккумулирует информацию о минимальных параметрах РТР в соответствии с Методическими указаниями по определению объемов и размещению резервов активной мощности в ЕЭС России при краткосрочном планировании электроэнергетического режима[5].

Решение оптимизационной задачи ВСВГО базируется на нормативно-правовых

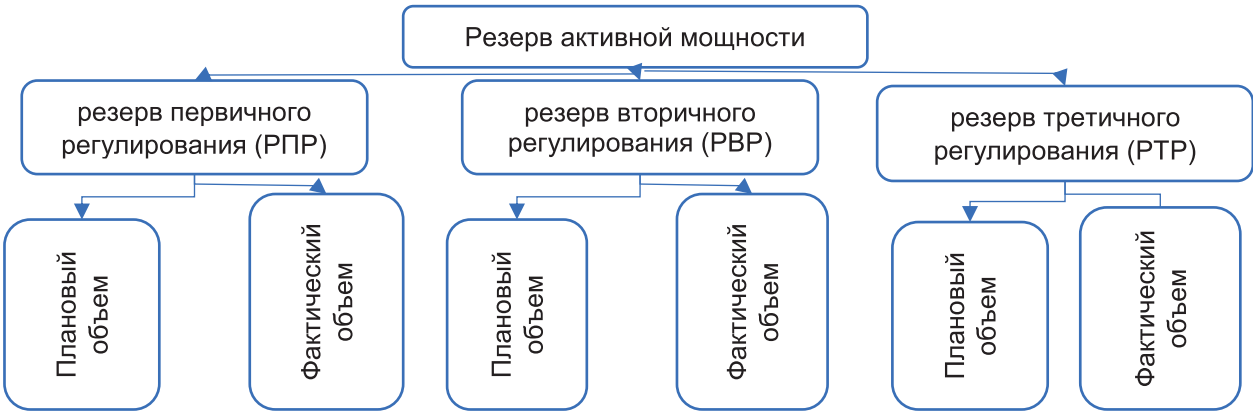


Рис. 1. *Структура резерва активной мощности*
Fig. 1. *Active power reserve structure*

[3]Приложение № 7 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка. Регламент проведения конкурентного отбора ценовых заявок на сутки вперед (с изм. от 22 ноября 2019 года Протокол № 26/2019 заседания Наблюдательного совета Ассоциации «НП Совет рынка»)

[4]Приложение к приказу АО «СО ЕЭС» от 15.02.2018 № 32. Стандарт «Резервы активной мощности Единой энергетической системы России. Определение объемов резервов активной мощности при краткосрочном Планировании» (в редакции от 15.02.2018).

[5]Приказ Министерства энергетики РФ от 15.10.2018 №882 (в редакции от 10.08.2023).

документах, регулирующих деятельность ОРЭМ[3,6-9]. С точки зрения участников, на ОРЭМ отбор ВСВГО проходит следующим образом рис. 2.

В соответствии с вводными данными и математической моделью, СО решает оптимизационную задачу ВСВГО с учетом «прогнозных графиков работы ЭС, надежности энергоснабжения и снижения стоимости электрической энергии»10. По итогам оптимизационного расчета ВСВГО СО определяется «состав единиц генерирующего оборудования (ЕГО) на сутки X и прогноз на период с суток X+1 по сутки X+2 (включительно)»[10].

В соответствии с проведенным оптимизационным расчетом, ВСВГО СО формирует «перечень ЕГО к включению/отключению»[10] в соответствии с заданным параметром ЭС[10].

Варианты назначения режимных генераторов:

– «включенное состояние или режим работы, необходимый для обеспечения поддержания параметров электроэнергетического режима в области допустимых значений энергетического режима»[10];

– «режимные генераторы, включенные (учтенные в работе) для подтверждения наличия резервов мощности (холодный резерв)»[10].

В состав исходных данных для расчета ВСВГО в качестве режимных генераторов, включенных для целей подтверждения наличия «фактических резервов мощности, еженедельно в расчетах ВСВГО на сутки проверки ВПФРМ (включение ЕГО для проверки фактического резерва мощности с понедельника на среду) включается не более 2 ЕГО по каждой ОЭС из числа включенных в указанный перечень. А в случае необходимости проверки ВПФРМ в отношении ПГУ (парогазовая установка), состоящей из более чем 2 ЕГО, включению подлежат все ЕГО, входящие в состав ПГУ»[8]. В случае, если в актуальный на дату расчета ВСВГО перечень включено более 2 ЕГО, включению в рамках процедуры ВСВГО подлежат ЕГО, отключенные ранее[8].

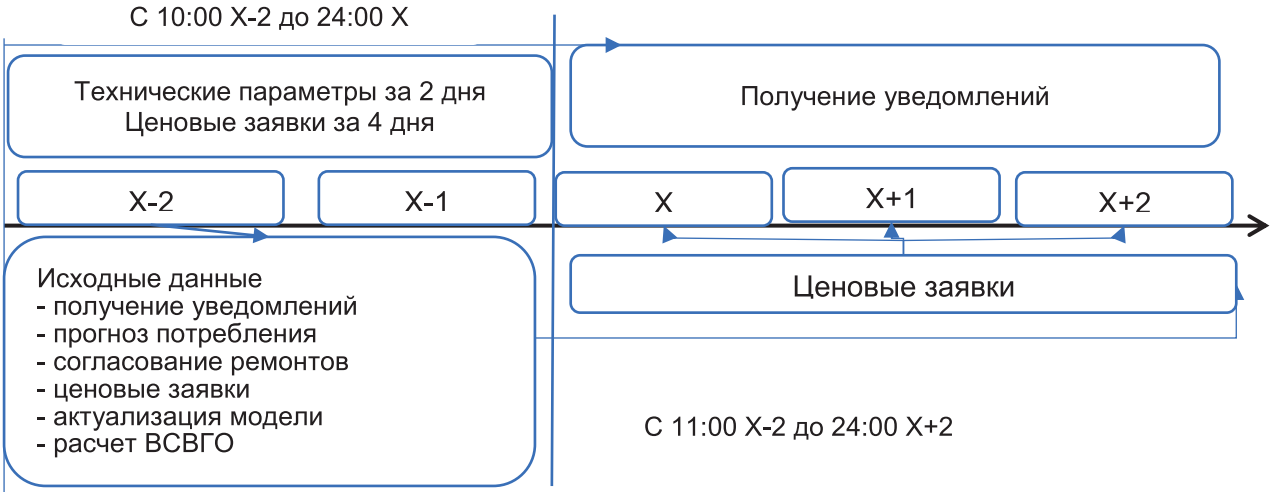


Рис. 2. *Модель ВСВГО (ежесуточный расчет выбора состава включенного генерирующего оборудования)*
Fig. 2. *Model of daily calculation of selected composition of included generating equipment*

[6]Приложение № 1.1 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка в перечне паспортных технологических характеристик генерирующего оборудования по форме 12 (приложение 1 к указанному Положению).
[7]Приложение № 3.1 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка Регламент проведения расчетов выбора состава генерирующего оборудования (с изм. от 23 апреля 2020 года. Протокол № 9/2020 заседания Наблюдательного совета Ассоциации «НП Совет рынка») (в редакции от 23.12.2019).
[8]Приложение № 5 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка Регламент подачи ценовых заявок участниками оптового рынка (с изм. от 21 марта 2023 года. Протокол № 6/2023 заседания Наблюдательного совета Ассоциации «НП Совет рынка»).
[9]Приложение № 13 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка).
[10]Официальный сайт Системный оператор единой энергетической системы. Режим доступа: https://www.so-ups.ru (дата обращения 12.02.2024).

С точки зрения генерации ценовая заявка формируется как пара «цена-количество» в почасовом варианте. Рассмотрим процедуру ВСВГО в рамках ОРЭМ на рис. 3.

Данная схема показывает принцип поведения генерирующей компании, которая формирует заявку в рамках ВСВГО. В контексте данной модели нашей задачей стоит анализ модели ВСВГО [5] с точки зрения обеспечения системной надежности энергосистемы.

В существующей математической модели используются параметры:

– «ограничения на параметры электроэнергетического режима (общесистемные)»[10];

– «ограничения, учитываемые при назначении СО ЕЭС режимных генераторов»[10];

– «ограничения, связанные с технологическим режимом работы электростанции, задаваемые участником ОРЭМ»[10].

Оптимизационная задача модели ВСВГО ранее рассматривалась многими авторами [1] как процесс решения экономической задачи. В ранних работах были выдвинуты предположения по решению оптимизационных задач [2, 4] с точки зрения генерации (стратегия поведения компании). В рамках данной работы рассмотрена концепция модели ВСВГО при обеспечении системной надежности энергосистем. Приоритетным направлением дальнейшей работы является решение оптимизационной задачи модели ВСВГО с дополнительным проведением оценки системной надежности и отслеживанием заданных критериев ее обеспечения.

АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА

Рассмотрим зарубежный опыт в решении задачи ВСВГО и учета критериев системной надежности при этом.

Великобритания. Современная модель оптового рынка электроэнергии Великобритании основана на предельном ценообразовании, при этом предельное ценообразование тесно связано со стоимостью электроэнергии, не позволяет/снижает возможности снижения зависимости от генерации, работающей на угле[11].

В рамках существующей структуры рынка электрической энергии анализируется балансовая надежность. При анализе балансовой надежности учитывался объем резервов мощности, превышающих прогнозируемый максимум нагрузки потребления, и нормативные отключения электросетевого и генерирующего оборудования.

С целью поддержки National Grid при обеспечении надежности и с учетом прогнозов о сокращении резервов мощности в 2013 г. в рамках «закона об электроэнергетике» был разработан механизм предоставления балансирующего резерва в экстренных ситуациях за счет участия потребителей – добровольное сокращение потребления в «окно готовности» для снижения нагрузки на ЭС[10].

Новый порядок торговли электроэнергией BETTA (от англ. British Electricity Tradingand Transmission Arrangements [16]) – процедура учета (расчета) небалансов, при этом сопоставляются объемы электроэнергии, приобретенной и реализованной по договорам с ре-

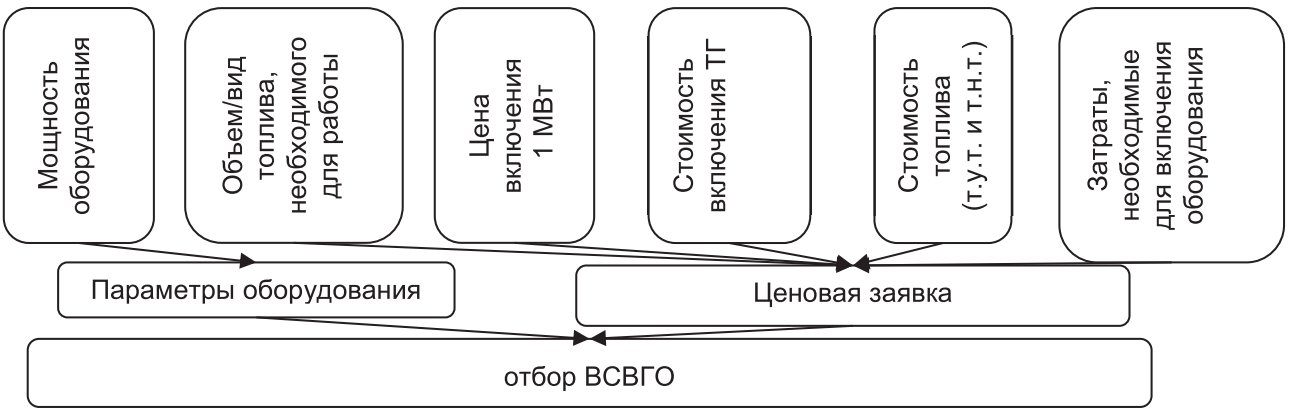


Рис. 3. *Процедура ВСВГО в рамках оптового рынка электроэнергии и мощности*
Fig. 3. *The selection procedure of included generating equipment composition within the wholesale electricity and capacity market*

[11]Review of Electricity Market Arrangements Consultation Document.

зультатами коммерческого учета физических объемов производства и потребления [16]. Объединение энергетических систем обусловлено распределением потоков электроэнергии, это, как правило, направление из Шотландии в Англию и Уэльс, что связано с расположением генераций на севере, в то время как основные потребители (спрос) на юге.

BETTA регламентирует деятельность «Балансирующего механизма» с точки зрения деятельности СО, а именно поддержание баланса между потреблением и производством. Основные положения отражены в Кодексе балансирования и расчетов[12] – Elexon [16], осуществляющим контроль и выполнение, а также обеспечивающим технические возможности участникам процесса.

Реализация электрической энергии, поставляемой в конкретный получасовой промежуток, проводится до так называемого «закрытия ворот», которое наступает за час до начала этого промежутка. Эти данные называются «окончательное физическое уведомление» и определяют реальную потребность в энергии в течение того или иного получаса[13]. Внесение дальнейших изменений в эти позиции не допускается.

Резервирование – постоянный резерв (услуга, предшествовавшая STOR, от англ. Short Term Operating Reserve [18]) был разработан для того, чтобы обеспечить доступность достаточного количества поставщиков с коротким уведомлением для защиты системы в случае потери генерации и непредвиденных изменений спроса в течение 20 мин. В данном контексте отсутствует вероятностный анализ энергетической системы, т.к. требования регламентированы и задаются детерминировано.

STOR разработан с учетом существования потенциальных поставщиков резервов, которые не могли соответствовать критерию ответа в течение 20 мин, но все же могли быть полезны для удовлетворения требований резерва Национальной сети. В связи с этим критерий времени ответа был увеличен с 20 до 240 мин[14].

Генераторы и пользователи спроса могут предоставлять услугу STOR. При этом поставщики STOR руководствуются определенными критериями:

– наличие вариантов – минимум 3 МВт или более генерирующей мощности, либо постепенное снижение спроса (могут быть с нескольких площадок);

– сроки поставки – предоставление договорного объема генерирующей мощности в течение 240 мин или меньше с момента получения инструкций;

– исполнение контрактных обязательств – обеспечение поставки договорного объема генерирующей мощности в течение как минимум двух часов по указанию;

– время остывания – период восстановления после использования не более 1200 мин (20 ч);

– частота расчета – не менее трех раз в неделю предоставление расчета STOR[14].

Критерии STOR могут дополняться в зависимости от состояния и потребностей энергосистемы (в том числе времени года, недели, суток). National Grid определяет «окно доступности» из отношения рабочих и нерабочих дней в рамках одного из 6 сезонов (год разделен на 6 сезонов).

По контракту STOR (рис. 4): поставщик услуг должен быть в состоянии достичь предусмотренного по контракту балансировочный механизм к моменту начала контрактного окна доступности. Для этого службе можно (при необходимости) дать указание перед контрактным окном – в начале так называемого «окна предварительной инструкции». Время начала окна перед инструкцией будет разным для каждого поставщика и рассчитывается как начало контрактного окна за вычетом контрактного времени ответа конкретного подразделения/объекта[14].

В ЭС Великобритании представлены 2 программы, отвечающие за регулирование частоты: «Firm Frequency Response»[14] (FFR, постоянная частотная характеристика) и «Enhanced Frequency Response»[14] (EFR, улучшенная частотная характеристика).

FFR – «основной параметр – способность выдачи не менее 1 МВт мощности в течение 30 с или снижение нагрузки в тех же параметрах»[14]. В целях затруднения входа National

[12]Balancing and Settlement Code (BSD). Режим доступа: https://bscdocs.elexon.co.uk (дата обращения: 15.02.2024).
[13]Ofgem. Режим доступа: https://www.ofgem.gov.uk/ (дата обращения: 15.02.2024).
[14]Ancillary service settlement guide short term operating reserve (STOR) от 01.12.2009.

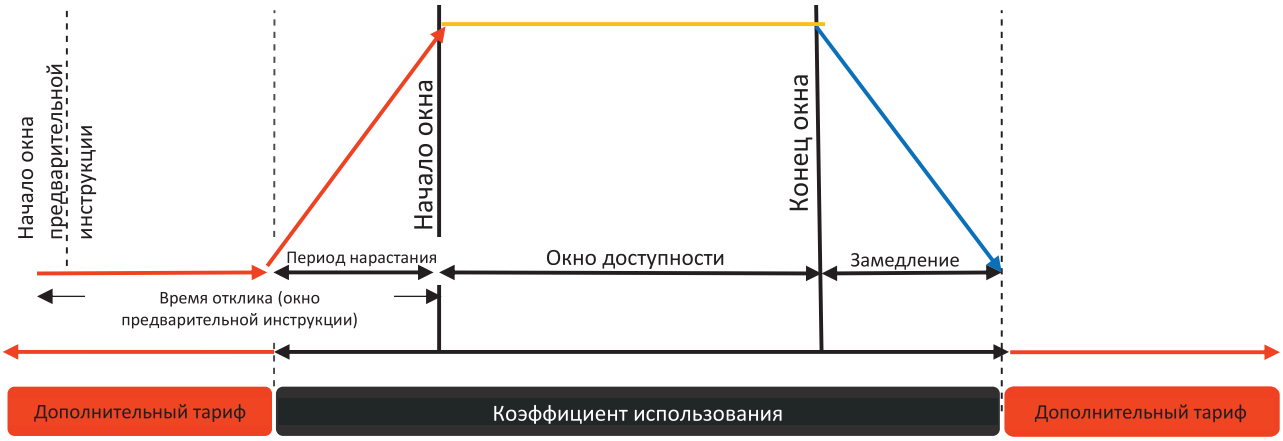


Рис. 4. *Хронология работы генератора, предоставляющего услугу STOR*
Fig. 4. *Operation chronology of the generator providing the STOR service*

Grid устанавливает барьеры, увеличивая долю Demand response. Реализация FFR [9] (приобретение ресурсов для FFR) осуществляется в рамках ежемесячных тендерных закупок[14].

EFR – продукт, который предусматривает «более быстрое – в пределах 1 с – реагирование в процессе регулирования частоты»[14]. Потребление и выработка находятся в прямой зависимости, изменяются пропорционально частоте. Данная услуга призвана «предупреждать сбои», а не реагировать на их возникновение, приоритетное направление применения – «накопитель энергии, а не управление спросом»[14].

Основным элементом является системный подход к работе, а именно территориальные особенности расположения генераций и выстраивания транспортной логистики, использование в совокупном объеме альтернативных источников энергии и учет полученной энергии в энергетическом балансе, использование балансирующего рынка для моделирования и регулирования работы энергосистемы Великобритании в то время, когда в отечественной модели преимущественно используется рынок на сутки вперед.

Европейский союз. Энергетические рынки Европейского союза представляют собой интегрированную структуру, объединенную в EEX (европейскую энергетическую биржу, от англ. European Energy Exchange) (рынки Германии, Франции, Бельгии, Нидерландов, Люксембурга, Швейцарии, Австрии и Соединенного Королевства). EEX AG разрабатывает, эксплуатирует и обеспечивает безопасное подключение, ликвидные и прозрачные рынки энергии и сопутствующих товаров, включая контракты на производные мощности, квоты на выбросы, сельскохозяйственную и грузовую продукцию.

EPEX SPOT [10] (от англ. European Power Exchange) управляет «наиболее ликвидными рынками на сутки вперед и внутридневными рынками» в Европе по средствам слепого аукциона, который проводится на постоянной основе один раз в день в почасовой разбивке следующего дня за расчетным. Заявки регистрируются участниками рынка до закрытия книги заявок в 12:00 по центральноевропейскому времени (10:20 для Великобритании и 11:00 для Швейцарии). Затем запускается алгоритм BCBГO.

В соответствии с Методологией ACER [15] (Агентство Европейского союза по сотрудничеству регулирующих органов энергетики от англ. European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators) о расчете величины потерянной нагрузки, стоимости нового ввода (CONE) и стандарта надежности (VOL.RS)) выделяются:

1) «фиксированная стоимость нового ввода» – это общий годовой чистый доход на единицу списанной мощности (за вычетом переменных затрат), получающий новый ресурс мощности в течение своего экономического срока службы с целью возмещения собственных капитальных и других ежегодных затрат;

2) «переменная стоимость» нового ввода (CONEvar) для новых вводов или «переменная стоимость обновления или пролонгации» (CORPvar) для существующих производствен-

ных ресурсов, которые обновляются, или срок службы которых продлевается) с учетом генерации или хранения в случае ресурса DSR (от англ. Demand Side Response) – это среднее значение минимальных рыночных цен на активацию данного конкретного ресурса мощности в течение экономического срока его службы. Схема DSR предлагает вознаграждение потребителям электроэнергии за сокращение потребления ими электроэнергии в часы пик, это поможет управлять нагрузкой на сеть во время критической нехватки электроэнергии;

3) «другие переменные операционные расходы» – это эксплуатационные расходы, не связанные с топливом или выбросами, а также расходы на техническое обслуживание, которые могут быть запланированы на основе эксплуатации ресурса мощности.

DSR работает, стимулируя потребителей энергии сокращать потребление энергии в периоды пикового спроса. Лучшим примером является либо снижение стоимости энергии за счет спотовых тарифов, либо возмещение затрат за счет участия в гибких рынках или рынках дополнительных услуг. Существуют различные механизмы компенсации балансирующих стимулов в зависимости от рынка, но эти два являются наиболее распространенными.

Гибкость – устройства отключаются в зависимости от относительного дисбаланса на внутридневных рынках. Например, когда вырабатывается недостаточно энергии, когда в данный период недостаточно солнечно или ветрено.

Вспомогательные услуги – на аукционе вспомогательных услуг устройства выставляются на день вперед в зависимости от рабочих параметров, например, на сколько часов они могут быть доступны в данный день. Если аукцион будет принят, эти устройства могут получить компенсацию за предоставление резервных услуг, а также дополнительную ценность за включение в случае необходимости.

Согласно статье 25 Регламента (ЕС) 2019/943 Европейского парламента и Совета от 5 июня 2019 года о внутреннем рынке электроэнергии, при применении механизмов наращивания мощности государства-члены ЕС должны иметь действующий стандарт надежности.

Этот стандарт надежности должен быть рассчитан с использованием, по крайней мере, CONE – стоимости нового входа и знае чения потери нагрузки VOLL (от англ. Value of Lost Load) за заданный период времени[15].

VOLL – величина потерянной нагрузки – величина, приписываемая потребителями неиспользованной энергии[14]. Она представляет собой максимальную цену, которую потребители готовы платить за снабжение энергией. По установленной цене для потребителей: при поставке электроэнергии они платят установленную цену, при отсутствии поставки потребители ничего не платят[16].

Анализ надежности ЭС в ЕС проводится в рамках Европейского объединения операторов электропередачи ENTSO-E (от англ. European Network of Transmission System Operators for Electricity) [13]. ENTSO-E является важным элементом экономики промышленности и сферы услуг. При этом анализ балансовой надежности в Европе должен основываться на «национальных оценках надежности»[16], подготавливаемых самостоятельно СО электропередачи, и должен «включать оценку надежности на пятилетний период, а также на период от 5 до 15 лет»[16].

Европейская система, в отличие от отечественной модели, балансирует между традиционными источниками энергии и альтернативными, в последнее время делая упор на альтернативные источники энергии. В связи с чем надежность энергетической системы постоянно меняется, при этом баланс между размещением производства и потребителей асимметричен, что накладывает свои «отпечатки». Следует отметить быстрый переход в сторону альтернативных источников энергии, что, в свою очередь, приводит к удорожанию энергии для конечных потребителей. С точки зрения технических особенностей по работе биржи особенностью является централизованное управление на всей территории ЕС, следовательно, заявки принимаются одномоментно повсеместно и участвуют в торгах.

[15]Официальный портал European Union Emissions Trading System – legal point of view. Режим доступа: https://emissions-euets.com (дата обращения: 12.02.2024)

[16]Официальный сайт National Grid ESO. Режим доступа: https://www2.nationalgrideso.com (дата обращения: 12.01.2024).

Австралия. В Австралии имеются оптовый рынок электроэнергии WEM (от англ. Wholesale Electricity Market) и Национальный рынок электроэнергии Австралии NEM (от англ. National Electricity Market). NEM – основной рынок электроэнергии Австралии, обслуживающий 88% населения.

Структура оптового рынка электроэнергии в Австралии представлена двумя самостоятельными финансовыми рынками, а именно биржевой рынок фьючерсных продуктов на электроэнергию (Австралийская биржа ценных бумаг (ASX) или через FEX Global (FEX)). Условия внебиржевых сделок обычно излагаются в соглашениях Международной ассоциации свопов и деривативов ISDA (от англ. International Swaps and Derivatives Association)[17].

Австралийский оператор энергетического рынка AEMO (от англ. Australian Energy Market Operator) управляет электроэнергетической системой таким образом, чтобы спрос на электроэнергию согласовывался одновременно. В рамках существующей энергосистемы электроэнергия, поставляемая генераторами, должна точно соответствовать тому, сколько электроэнергии используется потребителями, иначе может произойти ее отключение[17].

Спотовый рынок – это механизм, который AEMO использует для согласования поставок электроэнергии с электростанций с потреблением в реальном времени домашними хозяйствами и предприятиями[17-19].

Генераторы по расписанию отправляют предложения ежедневно каждые 5 мин [8]. AEMO на основе направленных заявок решают оптимизационную задачу ВСВГО исходя из принципа удовлетворения преобладающего спроса наиболее экономичным способом[20]. Затем «AEMO ставит под нагрузку генераторы, посылая целевые сигналы автоматического управления генерацией AGC (от англ. Automatic Generation Control – с учетом частоты, перетока мощности в ветвях, а также состояние контроллера генератора для обеспечения изменений параметров генерации»[21]) на каждый генерирующий блок.

Когда спотовая цена снижается, более дорогостоящие генераторы отключаются [7].

Предельная рыночная цена – максимальная рыночная стоимость MPC (от англ. Marginal Propensity of Consumer), которая ранее называлась значением потерянной нагрузки «VOLL – это цена, автоматически устанавливаемая, когда AEMO дает указание поставщикам сетевых услуг прервать поставку абонентам, чтобы сохранить баланс спроса и предложения в системе»[21].

AEMO поддерживает группу поставщиков услуг RERT (трейдер надежности и аварийного резерва, от англ. Reliability and Emergency Reserve Trader), которые при необходимости могут предоставить резерв с коротким уведомлением (от трех часов до семи дней) и со средним уведомлением (от десяти недель до семи дней), и для которых технические детали предварительно согласованы[17-19,22,23].

Панель RERT позволяет AEMO проводить ускоренный тендерный процесс в ситуациях

[17]Официальный сайт Австралийской комиссии по энергетическому рынку. Режим доступа: https://www.aemc.gov.au (дата обращения: 27.02.2024).

[18]Официальный сайт австралийского оператора энергетического рынка // Australian Energy Market Operator. Режим доступа: https://aemo.com.au/ (дата обращения: 27.02.2024).

[19]Официальный сайт австралийской комиссии по энергетическому рынку // Australian Energy Market Commission (Rule Determination National Electricity Amendment (Enhancement To The Reliability And Emergency Reserve Trader) Rule 2019 Proponent Aemo). Режим доступа: https://www.aemc.gov.au/rule-changes/enhancement-reliability-and-emergency-reserve-trader (дата обращения: 2.05.2019).

[20]Официальный сайт Департамента по вопросам изменения климата, энергетики, окружающей среды и водных ресурсов Австралии Режим доступа: https://www.dcceew.gov.au (дата обращения: 18.02.2024)

[21]Официальный сайт Operation Technology. Режим доступа: https://etap.com (дата обращения: 27.02.2024).

[22]Национальные Правила в области электроэнергетики Австралии (ред. от начала действия редакции 09.02.2024). Режим доступа: https://mobile.ruscable.ru/news/2021/8/27/Pravitelystvo_Avstralii_utverdilo_novye_pravila_dl/ (дата обращения: 2.05.2019).

[23]Официальный сайт австралийской комиссии по энергетическому рынку // Australian Energy Market Commission Updated Amended Panel RERT Guidelines - 18 August 2020 - Final for publication. Режим доступа: https://www.eeseaec.org/energeticeskij-profil-avstralii (дата обращения: 2.05.2019).

короткого и среднесрочного уведомления[24] [17].

В соответствии с заявленными параметрами, резерв, который может быть получен для RERT, включает:

1) «внеплановую нагрузку, которая может быть сокращена и восстановлена по запросу AEMO» [18,22,23];

2) «незапланированную генерирующую мощность (резервные дизели)»[18,22,23].

Резервы в рамках RERT не должны быть доступны NEM по какому-либо другому контракту или договоренности в те торговые интервалы, в которые требуется наличие резерва.

Кроме того, существует ряд критериев, которые AEMO будет использовать для оценки резерва, к ним относятся следующие: «доступность резерва в летний период; возможность включения (активация) резерва как блока мощностью не менее 10 МВт; возможность активации резерва (включения) при непрерывной работе с минимальным интервалом 30 мин; потенциальный резерв не подает заявки и оферты на Национальный рынок электроэнергии».

Если с помощью ESOO (от англ. Electricity Statement of Opportunities – заявление о возможностях в области электроэнергетики) прогнозируется неиспользованная энергия, AEMO может обеспечить резерв для длительного уведомления посредством приглашений к участию в тендере, если у нее есть уведомление о прогнозируемом дефиците за 10 недель или более[23].

Стандарты надежности NEM установлены Комитетом по надежности Австралийской комиссии по рынку энергии. Установленные стандарты в настоящее время требуют, чтобы резерв в год для каждого региона не превышал 0,002% от общей энергии, потребляемой в этом регионе в этом году. В рамках действующего законодательства AEMO обязано обеспечить передачу 850 МВт резерва в рамках NEM.

Положения о системе обеспечения надежности Национальных правил в области электроэнергетики предусматривают, что AEMO должна обеспечить достаточный резерв и убедиться, что надежность поставок соответствует стандарту надежности.

Результаты надежности измеряются с точки зрения недоотпущенной энергии, то есть количества энергии, необходимой потребителям, которая не может быть поставлена из-за нехватки мощности. Стандарт надежности требует, чтобы любой дефицит электропитания не превышал 0,002% от общей потребности в электроэнергии (оценки эффективности рынка и корректности использования параметров надежности, таких как предельная рыночная цена, более строгий промежуточный стандарт надежности, используется в качестве триггера для рыночных механизмов для предотвращения прогнозируемого дефицита поставок)[25]. С 2020 по 2025 г. применяется более жесткий стандарт резерва в размере 0,0006% для запуска Обязательства по обеспечению надежности розничных продавцов RRO (от англ. Retailer Reliability Obligation) [11].

В рамках своей рыночной деятельности AEMO стремится поддерживать частоту системы в безопасном диапазоне (между 49,85 и 50,15 Гц)[25].

Модель/механизм PASA (прогнозируемая оценка балансовой надежности системы, от англ. Projected Assessment of System Adequacy, рис. 5)[18]. PASA – «комплексная программа, которая включает в себя сбор, анализ и раскрытие информации о среднесрочной и краткосрочной безопасности энергосистемы и надежности перспектив поставок» [17]. Данный анализ проводится для информирования участников в целях принятия оптимальных решений о поставках, спросе и отключениях электроэнергии сетей электропередачи на сроки до 2 лет (или до 3 лет, если указано)[12].

Краткосрочные исходные данные PASA должны быть представлены каждым соответствующим запланированным производителем и участником рынка в соответствии с графиком (включая пожелания, планы, критерии оценки участников рынка):

[24]Официальный сайт Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» Режим доступа: https://www.hse.ru/ (дата обращения: 27.02.2024)

[25]State of the energy market 2023 // National Electricity. Режим доступа: Market https://www.aer.gov.au/publications/reports/performance/state-energy-market-2023 (дата обращения: 27.02.2024).

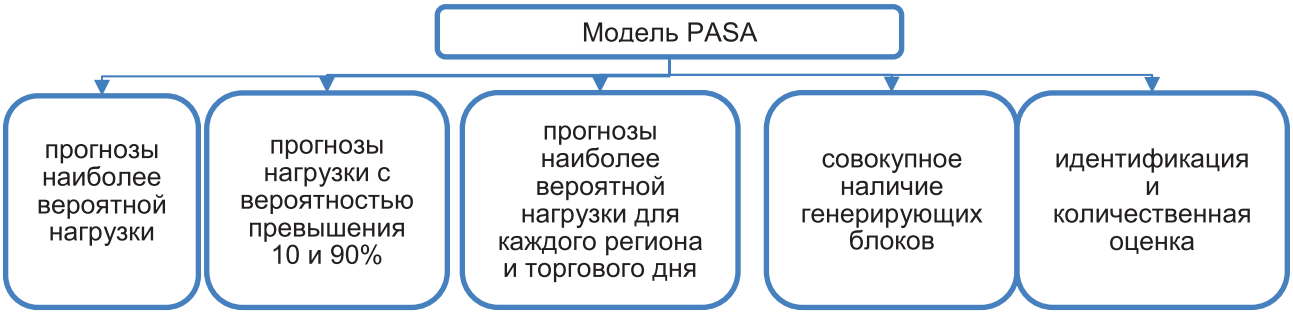


Рис. 5. *Параметры публикации в рамках краткосрочного PASA*
Fig. 5. *Publication settings within a short-term PASA*

1) «доступная мощность каждого запланированного генерирующего блока для каждого 30-минного периода в ожидаемых рыночных условиях»[26];

2) «доступность PASA каждого запланированного генерирующего блока в течение каждого 30-минного периода»[26];

3) «прогнозируемая ежедневная доступность реагирования оптового спроса для единиц реагирования оптового спроса, которые ограничены реагированием оптового спроса»[26];

4) «прогнозируемая ежедневная доступность энергии для плановых генерирующих блоков с ограничениями (режимные ограничения)»[26].

AEMO должна подготовить и опубликовать следующую информацию за каждый 30-минный период в течение периода, охватываемого краткосрочным PASA (см. рис. 5)[25].

При решении оптимизационной задачи PASA AEMO выявляет какие-либо отклонения в части соблюдения стандарта надежности – AEMO сообщает координатору, при этом формируются требования по сбросу чувствительных нагрузок[17].

В соответствии с законодательством, система отчетности при формировании заявок носит конфиденциальный характер, при этом публичное раскрытие возможно при наличии соответствующего разрешения от компании в то время, как в России СО публикует отчет по отобранным заявкам – раскрытие информации, что закреплено на законодательном уровне. При этом обновление информации по заявкам в Австралии возможно ежедневно каждые 5 мин. Стандарт надежности подразумевает активный мониторинг.

Соединенные Штаты Америки. Энергетический сектор Соединенных Штатов Америки представляет собой многополярную рыночную структуру, сформированную по географическому признаку (объединение нескольких штатов или 1 штат), структуре рынка, принятым стандартам и механизмам торговли, составу участников и другим показателям. В связи с этим регулирование рынков в США подразделяется на федеральное и местное, т.е. имеющее отношение к тому или иному электроэнергетическому рынку и определяющее правила деятельности этих рынков.

При этом энергетический рынок регулируется двумя организациями, играющими ключевую роль в регулировании и надзоре за электросетями в США: «Федеральная комиссия по регулированию энергетики» FERC (от англ. Federal Energy Regulatory Commission) и «Североамериканская корпорация электрической надежности» NERC (от англ. North American Electric Reliability Corporation). FERC – федеральное агентство, ответственное за регулирование различных аспектов энергетического сектора, включая рынки электроэнергии и передачу электроэнергии через границы штатов. NERC – некоммерческая организация, обозначенная как Организация по надежности электроэнергии ERO (от англ. Electric Reliability Corporation) для Северной Америки.

Функционал NERC включает в себя «разработку, согласование и контроль за соблюдением законодательства (стандарт надежности ЭС), мониторинг и анализ проблем, связанных с надежностью»[27]. FERC осущест-

[26]Final consolidated rule/ Indicative changes to the National Electricity Rules made by the National Electricity Amendment (Integrating energy storage systems into the NEM) Rule 2021.
[27]Официальный сайт Ассоциации НП «Совет Рынка». Режим доступа: https://www.np-sr.ru (дата обращения: 12.02.2024).

вляет контроль за участниками рынка в области соблюдения стандартов надежности, при выявлении нарушений накладывает штрафные санкции размером до 1 млн долл. в день[27].

Энергетический сектор США представлен в разрезе работы 12 оптовых рынков электроэнергии (объединены по территориальному признаку, составу участников, механизму торговли и нормативно-правовой базой).

Структура энергетического рынка США предусматривает наличие двух «операторов» ISO (независимый системный оператор, от англ. Independent System Operator) и RTO (региональная организация по передаче электроэнергии, от англ. Regional Transmission Organization). ISO – организация, созданная по рекомендации FERC. В областях, где установлена ISO, она координирует, контролирует и отслеживает работу энергетической системы, преимущественно в рамках одного штата США, но иногда охватывающее несколько штатов. RTO нередко выполняют те же функции, что и ISO, но охватывают большую географическую область, а также дополнительным является пункт в функционировании – большая ответственность за передающую сеть, как установлено FERC.

Шесть оптовых рынков управляются независимыми СО – (ISO): CAISO, MISO, ISO New England, New York ISO, PJM, Southwest Power Pool.

FERC не контролирует деятельность на территории штата Техас, т.к. данная территория находится в зоне интересов (функционирования) собственного оптового рынка рынок ERCOT [12]. Торговые пулы представлены на территории северо-запада, юго-запада, юго-востока, параллельно с иными региональными операторами с различной структурой управления взаимодействуют в двустороннем порядке[27].

Рассмотрим один из рынков PJM. Энергетический рынок устанавливает цены, выплачиваемые генераторам и оплачиваемые потребителями за объем ГВт электрической энергии, поставляемой в сеть PJM. Цена определяется с использованием узлового ценообразования, также известного как локальное предельное ценообразование. PJM публикует карту уровней цен на энергоносители по всей своей территории.

Участие в программах Управления спросом осуществляется с помощью агрегаторов – «поставщиков услуг по снижению спроса» CSP (от англ. Curtailment Service Provider). Агрегаторы являются агентами и несут ответственность за деятельность по DR (управление спросом, от англ. Demand Response) от имени потребителей электроэнергии на оптовых рынках PJM[14].

Цель экономической программы DR – это «предоставление возможности участникам рынка реагировать на изменение цены на электроэнергию (узловой маржинальной цены) на оптовом рынке в режиме реального времени и в режиме «на сутки вперед» посредством снижения уровня энергопотребления и получать соответствующую выплату за сокращение спроса» [6].

Игроки на РСВ, участвующие в DR, могут получить выплаты (расчет на основе маржинального ценообразования «на сутки вперед») в случае оформления заранее заявок на снижение нагрузки в рамках PJM [14].

В случае невыполнения обязательств при поддержании нагрузки в оговоренном объеме с учетом противоаварийной программы налагаются штрафные санкции. Следовательно, реакция игроков на снижение/увеличение нагрузки на период до 6 ч в течение 10 дней в летний период времени меняется.

Функционал рынка PJM с точки зрения надежности включает:

– регулирование частоты – принятие решения в течение 5 мин после команды СО;

– вращающийся резерв – принятие решения в течение 10 мин после команды СО;

– на сутки вперед – принятие решения в течение 30 мин после сигнала СО в режиме реального времени.

Ресурсы DR один из элементов противоаварийной программы – «снижение нагрузки на добровольной основе». По уведомлению PJM участники рынка принимают решение об участии в процессах, вызванных аварийными ситуациями, при этом оплата производится на уровне фактического объема, сложившегося в результате наступления аварийных событий.

CAISO – независимый СО, отвечающий за функционирование ОРЭМ и системных услуг на 80% территории штата Калифорния и небольшой части штата Невада в США [19–21]. CAISO – некоммерческая организа-

ция, которая не имеет в собственности объектов электросетевого комплекса. Членами CAISO являются организации-собственники (держатели активов) электросетевого комплекса.

PCB позволяет участникам фиксировать цены из расчета X-1 до наступления операционного дня (X) и хеджировать колебания цен, происходящие в режиме реального времени. За день (X-1) до фактической отправки участники отправляют предложения о поставках и заявки на спрос на электроэнергию. Заявки в почасовой разбивке соответствуют критериям ценообразования.

На основе заявок CAISO выстраивает графики (спрос и предложение) для каждого местоположения. Формирование цены осуществляется по средствам графических отображений в соответствии с временным промежутком. Считается, что предложения о поставке ниже указанной цены и предложения о спросе выше указанной, что означает, что они запланированы к отправке. Подтвержденные предложения вводятся в систему программного обеспечения для ценообразования вместе с обязательными ограничениями передачи для определения локальных предельных цен в различных точках системы.

Предложения от генераторов, запланированные в расчете на день вперед, оплачиваются в размере LMP [6] (локальная предельная цена, от англ. Locational Marginal Price) на день вперед за принятый объем. Запланированные поставщики должны производить установленное количество в режиме реального времени или покупать электроэнергию на рынке в режиме реального времени для замены того, что не было произведено.

Аналогичным образом оптовые покупатели электроэнергии, чьи заявки подтверждаются при рыночных расчетах на день вперед, оплачивают и закрепляют свое право потреблять согласованное количество по LMP на день вперед. Потребление электроэнергии в режиме реального времени, превышающее оплату за день вперед, оплачивается по LMP в режиме реального времени.

Обеспечение надежности ЭС в рамках CAISO осуществляется RDRR (от англ. Reliability Demand Response Resource), который обеспечивает поставку электроэнергии в течение 40 мин и объемом не менее 0,5 МВт по команде СО.

Энергетическая система США с точки зрения надежности включает принципы и подходы к оценке надежности ЭС, а именно структуру оценки по критерию N-1, балансовую надежность в ЭЭС – резерв мощности в разрезе подзон (учет резерва генерации с учетом пропускной способности – функционал генерации). Принципы, элементы и структура ЭС США и России во многом похожи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате анализа рынков электроэнергии в различных странах была подготовлена сводная таблица с отражением основных особенностей рынков. В каждой ЭС есть свои особенности в законодательстве в процессе выстроенного регулирования отраслью, но при этом качественные параметры (базовые параметры) остаются неизменными.

Рассмотрение решения оптимизационной задачи, а впоследствии модели/уравнений предполагает анализ показателей: анализ режима, проверку на наличие перегрузок, устойчивости ЭС, на допустимость уровней напряжений в узлах сети. Данные элементы необходимо исследовать в модели как в совокупности, так и при изменении состояния каждого элемента и рассмотрения результатов в перспективе смоделированных условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Грамотная организация спотового рынка электроэнергии позволяет определять оптимальные цены на электроэнергию, учитывая наиболее значимые особенности функционирования энергосистем.

2. В существующих моделях спотового рынка электроэнергии, применяемых в разных странах, учет системной надежности энергосистемы производится не на достаточном уровне, в основном детерминированным заданием норматива на резерв генерирующей мощности.

3. Для корректного учета особенностей обеспечения системной надежности энергосистем при организации деятельности спотового рынка электроэнергии целесообразно интегрировать вероятностную модель оцен-

Анализ оптовых рынков электроэнергии в различных странах
Analysis of wholesale electricity markets in various countries

Показатели	РФ	Великобритания	ЕС	Австралия	США
Количество ценовых зон	2+неценовые зоны	1 объединена в 3	28	1	21
Роль СО	регулятор	регулятор		регулятор	оператор биржи
Роль ВИЭ	–	+	+	+	+
Корректировка нагрузки в ЭС	дорогостоящие станции	ВИЭ	ВИЭ	ВИЭ	ВИЭ
Особенности планирования	утверждены прогнозы, ключевые показатели	целевые показатели функционирования энергосистемы	–	–	–
Подчинения СО, роль структуры	Централизованное, сильный регулятор	централизованное, единственный регулятор	централизованное, единственный регулятор	централизованное, сильный регулятор	плотная взаимосвязь, при этом самостоятельность
Прозрачность:					
Раскрытие информации, регламентов	+ структурировано на соответствующих порталах, отвечающие за направление	+ структурировано	+ информация общего плана на едином ресурсе, проблематично по ряду направлений	+ структурировано на соответствующих порталах, отвечающие за направление, раскрытие информации по запросу	+ информация общего плана на едином ресурсе, структурирована на соответствующих порталах, отвечающие за направление
Раскрытие механизмов расчета	+/- основная (базовое уравнение) модель в открытом доступе, при этом отсутствует прозрачность при формировании окончательного решения	– отсутствие в свободном доступе базовой расчетной модели для отбора (базовое уравнение)	– отсутствие в свободном доступе базовой расчетной модели для отбора (базовое уравнение)	+/- отсутствие в свободном доступе базовой расчетной модели для отбора (базовое уравнение), в регламентах присутствует описательная часть	– отсутствие в свободном доступе базовой расчетной модели для отбора (базовое уравнение)
Раскрытие входной, промежуточной и итоговой информации	+/- отсутствует информация по входным и промежуточным данным, на портале представлены итоговые расчеты	+/- отсутствует информация по входным и промежуточным данным, на портале представлены итоговые расчеты	+/- отсутствует информация по входным и промежуточным данным, на портале представлены итоговые расчеты	+/- частично на портале, по направлению деятельности, раскрытие информации преимущественно по запросу	+/- отсутствует информация по входным и промежуточным данным, на портале представлены итоговые расчеты
Регулирование объемов резерва	стандарт, п. РТР	STOR	данные отсутствуют	RERT	оперативный резерв на сутки вперед
Время подачи заявки для отбора	за 4 дня на каждый час суток до момента X и на 2 дня вперед	каждые 30 мин, за час до момента X	слепой аукцион 1 раз в день на следующий расчетный день	ежедневно, каждые 5 мин	заранее

ки системной надежности энергосистем для лучшей обоснованности при принятии решений по выбору включенного генерирующего оборудования.

4. Формирование прозрачного подхода к процедуре отбора оборудования с целью улучшения показателей, при которых участники ОРЭМ имеют возможность для более выгодного запуска произвести оценку своих возможностей, а также проанализировать работу других участников рынка. В данном вопросе учет необходимо отражать не только с экономической части, но и с технических возможностей оборудования, предъявления системных требований со стороны энергосистемы.

Список источников

1. Амелина А.Ю., Лисин Е.М., Анисимова Ю.А., Стриелковски В. Выбор оптимальной стратегии поведения генерирующей компании на рынке «на сутки вперед» в условиях рыночного регулирования // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2013. № 4. С. 63–68. EDN: SCEKWD.
2. Аракелян Э.К., Андрюшин А.В., Мезин С.В., Косой А.А., Ягупова Ю.Ю., Юпатов Д.А. [и др.]. Проблемы учета фактора надежности при выборе состава генерирующего оборудования ТЭЦ на оптовом рынке электроэнергии и пути их решения // Автоматика и телемеханика. 2022. № 5. С. 148–163. https://doi.org/16310.31857/S0005231022050105. EDN: ABWWKM.
3. Лебедев В.В. Развитие рынка электроэнергии в России – история и статистика результатов реформирования // Российский экономический интернет-журнал. 2022. № 1. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48367467 (дата обращения: 15.02.2024).
4. Пастухов О.В. Повышение точности выбора оптимального состава включенного генерирующего оборудования // Электроэнергетика глазами молодежи – 2016: материалы VII Международной молодежной научно-технической конференции (г. Казань, 19–23 сентября 2016 г.). Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2016. Т. 2. С. 347–350. EDN: MJSAFY.
5. Селезнев А.В. Программный комплекс для решения задачи выбора состава включенного генерирующего оборудования в условиях конкурентного рынка электроэнергии в России // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2015 (г. Москва, 29 сентября – 1 октября 2015 г.). Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2015. Т. 1. С. 281–290. EDN: WECDVH.
6. Cabot C., Villavicencio M. The demand-side flexibility in liberalised power market: A review of current market design and objectives // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2024. Vol. 201. P. 114643. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114643.
7. Chanatásig-Niza E., Ciarreta A., Zarraga A. A volatility spillover analysis with realized semi(co)variances in Australian electricity markets // Energy Economics. 2022. Vol. 111. P. 106076. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106076.
8. Cornell C., Dinh Nam Trong, Pourmousavi S.A. A probabilistic forecast methodology for volatile electricity prices in the Australian national electricity market // International Journal of Forecasting. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2023.12.003.
9. Fan Fulin, Zorzi G., Campos-Gaona D., Nwobu J. Wind-Plus-Battery system optimisation for frequency response service: The UK perspective // Electric Power Systems Research. 2022. Vol. 211. P. 108400. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108400.
10. Fridgen G., Michaelis A., Rinck M., Schöpf M., Weibelzahl M. The search for the perfect match: aligning power-trading products to the energy transition // Energy Policy. 2020. Vol. 144. P. 111523. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111523.
11. Flottmann J., Wild P., Todorova N. Derivatives and hedging practices in the Australian national electricity market // Energy Policy. 2024. Vol. 189. P. 114114. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114114.
12. Flottmann J. Australian energy policy decisions in the wake of the 2022 energy crisis // Economic Analysis and Policy. 2024. Vol. 81. P. 238–248. https://doi.org/10.1016/j.eap.2023.11.025.
13. Hirth L., Mühlenpfordt J., Bulkeley M. The ENTSO-E Transparency Platform – a review of Europe's most ambitious electricity data platform // Applied Energy. 2018. Vol. 225. P. 1054–1067. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.048.
14. Hale E.T., Bird L., Padmanabhan R., Volpi C. Potential roles for demand response in high-growth electric systems with increasing shares of renewable generation // National Renewable Energy Laboratory. Режим доступа: https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/70630.pdf (дата обращения: 30.09.2023).
15. Klopčič A., Hojnik J., Pustovrh A. ACER's success in establishing and ensuring the functioning of the internal energy market: through the eyes of NRAs and Traders // Managing global transitions. 2020. Vol. 18. Iss. 2. P. 91–110. https://doi.org/10.26493/1854-6935.18.91-110.
16. Liu Jinqi, Wang Jihong, Cardinal Joel. Evolution and reform of UK electricity market // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 161. Iss. C. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112317.
17. Prakash A., Ashby R, Bruce A., MacGill I. Quantifying reserve capabilities for designing flexible electricity markets: an Australian case study with increasing penetrations of renewables // Energy Policy. 2023. Vol. 177. P. 113551. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113551.

18. Rai U., Oluleye G., Hawkes A. Stochastic optimisation model to determine the optimal contractual capacity of a distributed energy resource offered in a balancing services contract to maximise profit // Energy Reports. 2024. Vol. 11. P. 5800–5818. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.05.049.
19. Ragosa G., Watson J., Grubb M. The political economy of electricity system resource adequacy and renewable energy integration: a comparative study of Britain, Italy and California // Energy Research & Social Science. 2024. Vol. 107. P. 103335. https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103335.
20. Wachs E., Engel B., Reliability versus renewables: modeling costs and revenue in CAISO and PJM // The Electricity Journal. 2020. Vol. 33. Iss. 10. P. 106860. https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106860.
21. Westgaard S., Fleten S.-E., Negash A., Botterud A., Bogaard K., Verling T.H. Performing price scenario analysis and stress testing using quantile regression: a case study of the Californian electricity market // Energy. 2021. Vol. 214. P. 118796. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118796.

References

1. Amelina A.Yu. Lisin E.M., Anisimova Yu.A., Strielkowski W. The optimal strategic choice of generating company behavior on the day-ahead market in conditions of market regulation. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013;4:63-68. (In Russ.). EDN: SCEKWD.
2. Arakelyan E.K., Andryushin A.V., Mezin S.V., Kosoj A.A., Yagupova Yu.Yu., Yupatov D.A., et al. Problems of accounting for the reliability factor when selecting the composition of generating equipment of the CHPP in the wholesale electricity market and ways to solve them. *Avtomatika i telemekhanika*. 2022;5:148-163. (In Russ.). https://doi.org/16310.31857/S0005231022050105. EDN: ABWWKM.
3. Lebedev V.V. Development of the electricity market in Russia – history and statistics of reform results. *Rossijskij ekonomicheskij internet-zhurnal.* 2022;1. Available from: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48367467 [Accessed 15th February 2024]. (In Russ.).
4. Pastukhov O.V. Increasing selection accuracy of optimal included generating equipment composition. In: *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2016: materialy VII Mezhdunarodnoj molodyozhnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii = Electric power industry through the eyes of youth – 2016: materials of the 7th International Youth Scientific and Technical Conference*. 19–23 September 2016, Kazan'. Kazan': Kazan State Energy University; 2016, vol. 2, p. 347-350. (In Russ.). EDN: MJSAFY.
5. Seleznev A.V. Software package for solving the selection problem of the composition of switched-on generating equipment in the conditions of a competitive electricity market in Russia. In: *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnyh sistem MLSD\'2015 = Management of MLSD'2015 large-scale system development*. 29 September – 1 October 2015, Moscow. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; 2015, vol. 1, p. 281-290. EDN: WECDVH. (In Russ.).
6. Cabot C., Villavicencio M. The demand-side flexibility in liberalised power market: A review of current market design and objectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024;201:114643. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114643.
7. Chanatásig-Niza E., Ciarreta A., Zarraga A. A volatility spillover analysis with realized semi(co)variances in Australian electricity markets. *Energy Economics.* 2022;111:106076. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106076.
8. Cornell C., Dinh Nam Trong, Pourmousavi S.A. A probabilistic forecast methodology for volatile electricity prices in the Australian national electricity market. *International Journal of Forecasting*. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2023.12.003.
9. Fan Fulin, Zorzi G., Campos-Gaona D., Nwobu J. Wind-Plus-Battery system optimisation for frequency response service: The UK perspective. *Electric Power Systems Research.* 2022;211:108400. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108400.
10. Fridgen G., Michaelis A., Rinck M., Schöpf M., Weibelzahl M. The search for the perfect match: aligning power-trading products to the energy transition. *Energy Policy*. 2020;144:111523. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111523.
11. Flottmann J., Wild P., Todorova N. Derivatives and hedging practices in the Australian national electricity market. *Energy Policy*. 2024;189:114114. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114114.
12. Flottmann J. Australian energy policy decisions in the wake of the 2022 energy crisis. *Economic Analysis and Policy*. 2024;81:238-248. https://doi.org/10.1016/j.eap.2023.11.025.
13. Hirth L., Mühlenpfordt J., Bulkeley M. The ENTSO-E Transparency Platform – a review of Europe's most ambitious electricity data platform. *Applied Energy.* 2018;225:1054-1067. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.048.
14. Hale E.T., Bird L., Padmanabhan R., Volpi C. Potential roles for demand response in high-growth electric systems with increasing shares of renewable generation. In: *National Renewable Energy Laboratory*. Available from: https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/70630.pdf [Accessed 30th September 2023].
15. Klopčič A., Hojnik J., Pustovrh A. ACER's success in establishing and ensuring the functioning of the internal energy market: through the eyes of NRAs and Traders. *Managing global transitions*. 2020;18(2):91-110. https://doi.org/10.26493/1854-6935.18.91-110.
16. Liu Jinqi, Wang Jihong, Cardinal Joel. Evolution and reform of UK electricity market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;161:C. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112317.

17. Prakash A., Ashby R, Bruce A., MacGill I. Quantifying reserve capabilities for designing flexible electricity markets: an Australian case study with increasing penetrations of renewables. *Energy Policy*. 2023;177:113551. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113551.
18. Rai U., Oluleye G., Hawkes A. Stochastic optimisation model to determine the optimal contractual capacity of a distributed energy resource offered in a balancing services contract to maximise profit. *Energy Reports.* 2024;11:5800-5818. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.05.049.
19. Ragosa G., Watson J., Grubb M. The political economy of electricity system resource adequacy and renewable energy integration: a comparative study of Britain, Italy and California. *Energy Research & Social Science.* 2024;107:103335. https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103335.
20. Wachs E., Engel B., Reliability versus renewables: modeling costs and revenue in CAISO and PJM. *The Electricity Journal.* 2020;33(10):106860. https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106860.
21. Westgaard S., Fleten S.-E., Negash A., Botterud A., Bogaard K., Verling T.H. Performing price scenario analysis and stress testing using quantile regression: a case study of the Californian electricity market. *Energy.* 2021;214:118796. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118796.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Добрынина Юлия Эдуардовна,
аспирант,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
✉ yulia071294@mail.ru

Крупенёв Дмитрий Сергеевич,
к.т.н., доцент,
заведующий лабораторией надежности
топливо- и энергоснабжения,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
krupenev@isem.irk.ru
https://orcid.org/0000-0002-3093-4483

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yulia E. Dobrynina,
Postgraduate Student,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
✉ yulia071294@mail.ru

Dmitry S. Krupenev,
Cand. (Eng.) Sci., Associate Professor,
Head of the Laboratory of Fuel and Energy Supply Reliability,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
krupenev@isem.irk.ru
https://orcid.org/0000-0002-3093-4483

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 21.05.2024 г.; принята к публикации 14.06.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 20.04.2024; approved after reviewing 21.05.2024; accepted for publication 14.06.2024.

iPolytech Journal 2024. Т. 28. № 2. С. 290-302 ISSN 2782-4004 (print)
2024;28(2):290-302 ISSN 2782-6341 (online)

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья
УДК 536.2:519.63
EDN: HYUOIW
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-290-302

Задача Стефана в тепловыделяющем цилиндрическом образце с граничными условиями третьего рода: расчёт времени расплавления

И.Г. Донской[1]✉

[1]*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия*

Резюме. Цель – установить кинетические закономерности расплавления тепловыделяющего цилиндрического элемента в заведомо надкритических условиях с помощью численного моделирования. Объектом исследования является процесс плавления в однородном образце, выделяющем теплоту за счет протекания реакции или электромагнитного нагрева. Теплофизические свойства образца принимаются постоянными в пределах твердой и жидкой фаз. Основным инструментом исследования является численная модель, построенная на основе нестационарной задачи Стефана в тепловыделяющем теле и включающая описание процессов теплопроводности и плавления. Фазовый переход описывается в энтальпийном представлении. Для выбора параметров численной модели (шагов сетки) проводится исследование точности разностной схемы. В результате проведенных исследований получены расчетные зависимости основных характеристик плавления (время расплавления и максимальная температура образца в момент расплавления) от управляющих параметров (интенсивность тепловыделения, величина теплового эффекта плавления, отношение коэффициентов теплопроводности фаз). С помощью некоторых приближений (усреднение температуры, квазистационарное распределение) получены формулы для оценки времени расплавления исследуемого образца. Расчеты показали, что изменение теплофизических свойств образца (коэффициентов теплопроводности, теплового эффекта) оказывает существенное влияние на скорость его плавления. Установлено, что зависимость времени расплавления от интенсивности тепловыделения и теплового эффекта фазового перехода качественно совпадает с приближенными моделями, но существенно отличается от них количественно, особенно в области малых отклонений от критической интенсивности тепловыделения. Проведенные расчеты могут быть использованы при оценке термомеханической устойчивости материалов с внутренним тепловыделением. Разработанная численная модель дает возможность исследовать процессы плавления в широком диапазоне условий, в том числе при изменении граничных условий.

Ключевые слова: фазовые переходы, численное моделирование, хранение тепловой энергии

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. Задача Стефана в тепловыделяющем цилиндрическом образце с граничными условиями третьего рода: расчёт времени расплавления // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 290–302. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-290-302. EDN: HYUOIW.

POWER ENGINEERING

Original article

Stefan problem for a heat-generating cylindrical sample with boundary conditions of the third kind: calculation of melting time

Igor G. Donskoy[1]✉

[1]*Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia*

Abstract. We determine the kinetic patterns of melting in a heat-generating cylindrical element under invariable supercritical conditions using numerical modelling. The study focuses on the melting process in a homogeneous sample that generates heat either through a chemical reaction or electromagnetic heating. The thermophysical properties of the sample were assumed to be constant in both solid and liquid phases. The main tool used in the study was a numerical model based on the nonstationary Stefan problem in a heat-generating body, which incorporates

© Донской И.Г., 2024

the descriptions of heat conduction and melting processes. The phase transition was described in terms of enthalpy. In order to select the parameters of the numerical model (grid steps), the accuracy of the difference scheme was investigated. The study presents calculated dependencies of the main melting characteristics (melting time and the maximum sample temperature at melting) on control parameters (heat generation intensity, the heat effect of melting and the ratio of thermal conductivity coefficients of the phases). By using specified approximations (temperature averaging and quasi-stationary distribution), formulas were derived to estimate the melting time of the sample. The calculations showed that the variations in the thermal properties of the sample (thermal conductivity coefficients and heat effect) significantly influence the melting rate. It was demonstrated that although the relationship between the melting time and the intensity of heat generation and the thermal effect of the phase transition is consistent with the approximate models, there is a significant quantitative difference between them, in particular, for small deviations from the critical heat generation intensity. The calculations can be used to assess the thermomechanical stability of materials with internal heat generation. The developed numerical model allows melting processes to be investigated under a wide range of conditions, including varying boundary conditions.

Keywords: phase transitions, numerical modeling, thermal energy storage

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. 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.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи теплопроводности, связанные с критическими явлениями, часто встречаются в теплоэнергетике и химической технологии. Наиболее известными уравнениями такого рода являются уравнения теплового взрыва [1]. Похожие задачи возникают в гидромеханике многофазных сред [2–4]. В теплоэнергетике можно отнести сюда задачи Стефана с внутренним тепловыделением [5]. Изменение фазового состояния при объемном тепловыделении происходит в элементах теплоэнергетических установок, при термической обработке материалов и в химических реакторах [6–10]. Конкретные условия теплообмена существенно зависят от исследуемого процесса, однако качественные закономерности, которые удается получить на простых моделях, могут быть применены при анализе более сложных конфигураций. Наиболее простую формулировку можно получить, если рассматривать пространственно-одномерные задачи, среди которых традиционно выделяются задачи с плоской, цилиндрической и сферической симметрией.

В зависимости от того, является ли плавление целевым или неблагоприятным процессом, необходимо выбирать условия нагрева таким образом, чтобы обеспечить наиболее быстрый прогрев образца, или наоборот, чтобы избежать достижения критических условий. Например, при запасании тепловой энергии в материалах с фазовыми превращениями необходимо поддерживать подходящую скорость теплоотдачи, при этом после исчерпания емкости теплового аккумулятора дальнейший нагрев становится нецелесообразным. При исследовании аварийных режимов работы тепловыделяющих элементов важно оценивать время, в течение которого образец может поддерживать механическую устойчивость за счет внешней твердой оболочки. В обоих случаях нужно знать скорость движения фронта фазового перехода внутри образца и ожидаемое время его проплавления, то есть время достижения этим фронтом границы области. Представленная задача пока не решена в общем виде, поэтому для ее решения обычно используются численные методы.

В настоящей работе рассматривается одномерная цилиндрическая задача Стефана с внутренним тепловыделением, в которой возможно проплавление внешней поверхности (скорость теплообмена на внешней поверхности конечна). С помощью численной модели исследуется продвижение фронта плавления с учетом тепловыделения и изменения теплофизических свойств фаз. Целью работы является получение зависимости времени расплавления от условий и сравнение приближенных решений с численными.

СТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА

Рассмотрим стационарную задачу теплопроводности в образце с однородным тепловыделением в безразмерных переменных:

$$\frac{1}{\xi}\frac{d}{d\xi}\left(\xi\frac{d\theta}{d\xi}\right)+Q=0\,. \qquad (1)$$

Граничные условия для этой задачи следующие:

$$\frac{d\theta}{d\xi}(0)=0;\ \frac{d\theta}{d\xi}(1)=-Bi\theta(1). \qquad (2)$$

При достижении температуры $\theta_m = 1$ происходит фазовый переход, при этом появляется фазовая граница ξ_m. Тогда вместо уравнения (1) будем рассматривать два уравнения для двух фаз:

$$\frac{1}{\xi}\frac{d}{d\xi}\left(\xi\frac{d\theta_s}{d\xi}\right)+Q=0,\ \xi>\xi_m; \qquad (3)$$

$$\frac{\kappa}{\xi}\frac{d}{d\xi}\left(\xi\frac{d\theta_l}{d\xi}\right)+Q=0,\ \xi<\xi_m. \qquad (4)$$

Отметим, что уравнение (4), по сути, должно включать слагаемые, учитывающие свободноконвективный перенос [11]. В настоящей работе мы пренебрегаем конвективными эффектами (в некоторых случаях можно считать, что эти эффекты сводятся к изменению эффективного коэффициента теплопроводности).

Коэффициент κ учитывает различие в коэффициентах теплопроводности фаз. Условие на фазовой границе для стационарного состояния записывается в следующем виде:

$$\theta_s(\xi_m)=\theta_l(\xi_m)=1,\ \frac{d\theta_s}{d\xi}(\xi_m)=\kappa\frac{d\theta_l}{d\xi}(\xi_m). \qquad (5)$$

В работах [5, 11, 12] получено аналитическое решение для координаты ξ_m в приближении $Bi = \infty$. Общее решение (1) можно записать в виде [12]:

$$\theta=-\frac{Q}{4}\xi^2+C_1\ln\xi+C_2. \qquad (6)$$

Граничные условия (2) позволяют определить постоянные интегрирования:

$$\theta_l=1+\frac{Q}{4\kappa}\left(\xi_m^2-\xi^2\right); \qquad (7)$$

$$\theta_s=\frac{Q}{4}\left(1-\xi^2\right)+\left[\frac{1-\frac{Q}{4}\left(1-\xi^2\right)-\frac{Q}{2Bi}}{\ln\xi_m-\frac{1}{Bi}}\right]\ln\xi- \qquad (8)$$
$$-\frac{1}{Bi}\left[\frac{1-\frac{Q}{4}\left(1-\xi_m^2\right)-\frac{Q}{2Bi}}{\ln\xi_m-\frac{1}{Bi}}-\frac{Q}{2}\right].$$

Граничные условия (5) дают уравнение для определения положения границы ξ_m в следующем виде:

$$\frac{1-\frac{Q}{4}\left(1-\xi_m^2\right)-\frac{Q}{2Bi}}{\ln\xi_m-\frac{1}{Bi}}=0. \qquad (9)$$

Если в уравнении (9) положить $Bi = \infty$, то физический корень будет равен:

$$\xi_m=\sqrt{1-\frac{4}{Q}}. \qquad (10)$$

Это известный результат [5]. В общем случае уравнение (9) дает поправку на коэффициент теплоотдачи в виде [13]:

$$\xi_m=\sqrt{1-\frac{4}{Q}+\frac{2}{Bi}}. \qquad (11)$$

Это уравнение дает не только условие начала плавления ($\xi_m = 0$):

$$Q_{\min}=\frac{4}{1+\frac{2}{Bi}}, \qquad (12)$$

но и условие расплавления внешней границы ($\xi_m = 1$):

$$Q_{\max}=2Bi. \qquad (13)$$

Для плоской и сферической симметрии формулы (12) и (13) можно обобщить:

$$Q_{\min}=\frac{2n}{1+\frac{2}{Bi}}; \qquad (14)$$

$$Q_{\max}=nBi, \qquad (15)$$

где n – число, соответствующее симметрии образца (1 для плоского слоя, 2 для цилиндра, 3 для шара). При граничных условиях первого рода на внешней границе (т.е. формально при $Bi \to \infty$) уравнения (14) и (15) переходят в известные формулы.

Отметим, что для стационарной задачи число Стефана St, т.е. безразмерный тепловой эффект фазового перехода, не влияет на решение, что естественно, поскольку для неподвижного фронта фазового перехода достаточно условий (5). Обычно число Стефана определяется теплофизическими свойствами материнской фазы, в этом случае в настоящей работе применяется следующее определение [5]:

$$St = \frac{c\Delta T_m}{\Delta h_m}. \quad (16)$$

Здесь c – соответственно, удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); Δh_m – удельный тепловой эффект плавления, Дж/кг; ΔT_m – разность между температурой плавления и температурой окружающей среды, К.

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА: УСРЕДНЕННАЯ МОДЕЛЬ

Помимо условий расплавления нас интересует время, за которое расплавление произойдет после начала нагрева. При этом можно рассмотреть два предельных случая, для которых уравнение теплопроводности сводится к обыкновенному дифференциальному уравнению. В первом случае пренебрегаем теплопотерями и рассматриваем прогрев адиабатического образца:

$$\frac{d\theta}{dt} = Q. \quad (17)$$

Этот случай предельно прост, хотя необходимо учесть, что после достижения температуры плавления выделяющаяся теплота расходуется только на фазовый переход. Полное расплавление достигается за время:

$$\tau_m = \frac{1 + \frac{1}{St}}{Q}. \quad (18)$$

Другой предельный случай – это случай высокой теплопроводности, который дает уравнение для средней температуры образца в следующем виде:

$$\frac{d\bar{\theta}}{dt} = -nBi\bar{\theta} + Q. \quad (19)$$

После достижения температуры плавления нужно учесть затраты теплоты на фазовый переход, и тогда получаем формулу:

$$\tau_m = \frac{1}{nBi}\ln\left(\frac{Q}{Q - nBi}\right) + \frac{1}{St\left(Q - nBi\right)}. \quad (20)$$

Первое слагаемое – это время прогрева до температуры плавления, второе слагаемое – время полного расплавления образца. Условие неотрицательности выражения под логарифмом в (20) совпадает с условием (15). При $Q >> nBi$ выражение (20) переходит в (18).

При $Q \sim nBi$ второе слагаемое в (20) резко возрастает (принятые упрощения оказываются слишком грубыми). Для регуляризации можно частично учесть неоднородность температуры в образце, если ввести в формулу (20) эффективную температуру границы. Такой прием кажется противоречащим самой постановке задачи, поскольку температура границы по условию должна стать равной температуре плавления. Однако эффективная температура границы в данном случае осредняется по времени, а не по сечению, как это делалось при выводе уравнения (19). Формула (20) модифицируется следующим образом:

$$\tau_m = \frac{1}{nBi}\ln\left(\frac{Q}{Q - nBi}\right) + \frac{1}{St\left(Q - nBi\theta_{eff}\right)}. \quad (21)$$

Эффективная температура границы θ_{eff} может быть чувствительной к значениям Q и Bi. По сути, это подгоночный параметр для упрощенной модели расплавления образца.

В работе [14] на основании численных результатов предложена формула для времени установления стационарного состояния: $\tau_m St$ = const (для небольших значений St): как видно из формул (18) и (20), такая зависимость действительно наблюдается, если $St << 1$.

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА: ОДНОМЕРНОЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ

Можно найти решение задачи теплопроводности в твердой фазе до начала плавления и таким образом определить время прогрева до начала плавления.

Нестационарное уравнение теплопроводности с постоянным объемным тепловыделением выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{1}{\xi}\frac{\partial}{\partial\xi}\left(\xi\frac{\partial\theta}{\partial\xi}\right) + Q. \quad (22)$$

Выберем граничные условия:

$$\frac{\partial\theta}{\partial\xi}(t,0) = 0;\ -\frac{\partial\theta}{\partial\xi}(t,1) = Bi\theta(t,1). \quad (23)$$

Теперь перейдем от температуры θ к новой переменной ϕ, определенной следующим образом:

$$\varphi = \frac{\theta}{Q} + \frac{\xi^2}{4}. \quad (24)$$

Можно видеть, что такое преобразование приводит уравнение (17) к однородному виду:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}=\frac{1}{\xi}\frac{\partial}{\partial\xi}\left(\xi\frac{\partial\varphi}{\partial\xi}\right). \qquad (25)$$

Граничные условия при этом тоже несколько изменяются:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\xi}(t,0)=0;$$
$$-\frac{\partial\varphi}{\partial\xi}(t,1)=-\frac{1}{2}+Bi\left[\varphi(t,1)-\frac{1}{4}\right]. \qquad (26)$$

Начальное условие для (25) при начальном распределении температуры $\theta(0,\xi) = 0$ преобразуется в $\varphi(0,\xi) = 1/4\ \xi^2$. Решение уравнения (25) можно представить в виде функциональных рядов, однако нас интересует только максимальная температура, которая достигается в центре образца. В стационарном состоянии распределение φ равномерно:

$$\varphi(t\to\infty,\xi)=\frac{1}{4}+\frac{1}{2Bi}. \qquad (27)$$

При $\varphi = Q^{-1}$ это выражение ожидаемо совпадает с условием (12). Если на стадии прогрева устанавливается регулярный режим, то температура плавления в центре образца достигается за время:

$$\tau_1=\frac{1}{\mu_1^2}\ln\left(\frac{4}{1-\frac{4}{Q}+\frac{2}{Bi}}\right). \qquad (28)$$

Здесь μ_1 – это первый корень характеристического уравнения $\mu = Bi\ J_0(\mu) / J_1(\mu)$ [15].

Распространение фронта по радиусу образца можно в квазистационарном приближении описать следующим уравнением:

$$\frac{1}{St}\frac{d\xi_m^2}{dt}=\frac{4+Q\left(\xi_m^2-1-\frac{2}{Bi}\right)}{\ln\xi_m^2-\frac{2}{Bi}}. \qquad (29)$$

Уравнение (29) является обобщением результата работы [5] для конечных чисел *Bi* (см. также [14]). Тогда для сверхкритических условий можно записать, что время расплавления равно:

$$\tau_m=\frac{1}{\mu_1^2}\ln\left(\frac{4}{1-\frac{4}{Q}+\frac{2}{Bi}}\right)+$$
$$+\frac{1}{St}\int_0^1\frac{\ln\eta-\frac{2}{Bi}}{4+Q\left(\eta-1-\frac{2}{Bi}\right)}d\eta \qquad (30)$$

Полное время расплавления складывается из времени прогрева до температуры начала плавления и квазистационарного движения фронта от центра до внешней границы образца. Для малых *St*, когда условие квазистационарности выполняется достаточно хорошо, совпадение оказывается достаточно хорошим. Нас, однако, интересует более общая постановка.

Для проверки зависимостей, полученных в разделах 2 и 3, нужны численные расчеты. Численные методы решения задачи Стефана, как известно, часто требуют специальных приближений (по сравнению с методами решения задач с неподвижными фазами). В следующем разделе подробно обсуждается численный метод и даются оценки точности численного решения.

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

Рассмотрим нестационарную задачу теплопроводности с внутренним тепловыделением. Для цилиндрической симметрии уравнение для температуры записывается следующим образом:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\begin{cases}\frac{\kappa}{\xi}\frac{\partial}{\partial\xi}\left(\xi\frac{\partial\theta}{\partial\xi}\right)+Q, \xi<\xi_m\\ \frac{1}{\xi}\frac{\partial}{\partial\xi}\left(\xi\frac{\partial\theta}{\partial\xi}\right)+Q, \xi>\xi_m\end{cases}. \qquad (31)$$

Граничные и начальные условия следующие:

$$\theta(0,\xi)=0;\ \frac{\partial\theta}{\partial\xi}(t,0)=0;\ \frac{\partial\theta}{\partial\xi}(t,1)=-Bi\theta, \qquad (32)$$

$$-\kappa\frac{\partial\theta}{\partial\xi}(t,\xi_m^-)=-\frac{\partial\theta}{\partial\xi}(t,\xi_m^+)+\frac{1}{St}\frac{d\xi_m}{dt};$$
$$\theta(t,\xi_m)=1. \qquad (33)$$

Нас интересует метод решения, позволяющий свободно варьировать параметры

задачи, в том числе добавлять новые слагаемые (например, связанные с дополнительными механизмами переноса). Поэтому в настоящей работе задача (31)–(33) решается численно, с использованием сеточной аппроксимации:

$$\frac{\theta_i - \theta_i^0}{\tau} = \frac{1+(\kappa-1)\delta}{h^2}\ \xi_i$$
$$\left[\frac{\xi_{i-1}}{\xi_i}\theta_{i-1} + \theta_{i+1} - \left(1+\frac{\xi_{i-1}}{\xi_i}\right)\theta_i\right] + Q. \quad (34)$$

Здесь индекс 0 соответствует предыдущему временному слою; индикатор δ равен 0 для нерасплавившейся области и равен 1 для расплавившейся области.

Граничные условия для сеточной функции записываются в следующем виде:

$$\theta_1 - \theta_2 = 0;\ (1+hBi)\theta_N - \theta_{N-1} = 0. \quad (35)$$

Вместо граничного условия (33) удобнее использовать вариант энтальпийной схемы [16, 17]. Для этого вводим новую переменную *X*, которая характеризует долю нерасплавленного компонента. В начальный момент времени $X(0,\xi) = 1$. Затем плавление протекает согласно уравнению:

$$\frac{\partial X^2}{\partial t} = \begin{cases} 0, \theta < 1 \\ -2StX\left[\frac{1}{\xi}\frac{\partial}{\partial\xi}\left(\xi\frac{\partial\theta}{\partial\xi}\right) + Q\right], \theta \ge 1 \end{cases}. \quad (36)$$

Здесь множитель 2*X* в нижнем выражении правой части учитывает исчерпание нерасплавленного вещества: после достижения $X = 0$ плавление прекращается. Соответственно, индикатор *δ* в уравнении (34) становится непрерывной величиной, причем $\delta = 1 - X$.

Преимущество энтальпийной схемы в данном случае состоит в том, что при высоких значениях *Q* фронт плавления в основном распространяется не за счет теплопроводности, а за счет локального нагрева. Поэтому использование разностных схем для определения положения фронта плавления из (33) может оказаться некорректным.

При численном решении вместо уравнения (36) рассматривается простой тепловой баланс каждого расчетного элемента: если в *i*-м элементе $\theta_i > 1$ и $X_i > 0$, то плавление протекает либо до тех пор, пока θ_i не снижается до 1, либо до тех пор, пока X_i не становится равным нулю. Такая проверка, однако, требует нахождения промежуточного распределения температуры. Поэтому решение проводится с помощью расщепления по физическим процессам. На первом этапе решается задача теплопроводности с фиксированным фазовым состоянием образца. Полученное распределение температуры θ^* позволяет проверить состояние образца в соответствии с формулами:

$$X_i = \begin{cases} X_i^0, \theta_i^* \le 1 \\ X_i^0 - \min\left\{St\left(\theta_i^* - 1\right), X_i^0\right\}, \theta_i^* > 1 \end{cases}. \quad (37)$$

После обновления фазового состояния образца необходимо обновить температурное поле:

$$\theta_i = \theta_i^* - \frac{X_i - X_i^0}{St}. \quad (38)$$

Другим вариантом может быть разбиение задачи теплопроводности на два шага: первый шаг позволяет получить промежуточное распределение температуры θ*, для которого определяется скорость плавления вещества в расчетных элементах; на втором шаге полученная скорость плавления явно учитывается в задаче теплопроводности как сток теплоты. Отметим, что расщепление делает алгоритм устойчивее в случаях, когда возможно не только плавление, но и кристаллизация вещества: при малых числах *St* уравнение (38) может приводить к перегреву на границе фазового перехода, который сглаживается при использовании двухшаговой схемы.

Для энтальпийной схемы положение фронта плавления приходится определять как линию заданной степени конверсии (например, $X = 0{,}5$). На рис. 1 показана зависимость численного решения от параметров сетки. Из графиков (в) и (г) видно, что схема имеет первый порядок точности по *h* и *τ*.

Решение задачи сводится, таким образом, к решению системы разностных уравнений (34), (35) для температуры и (37) и (38) для доли расплавленного компонента. Условием расплавления образца при использовании уравнения (33) было бы достижение фронтом фазового перехода границы образца; в нашем случае это расплавление граничного расчетного элемента, т.е. $X_N = 0$.

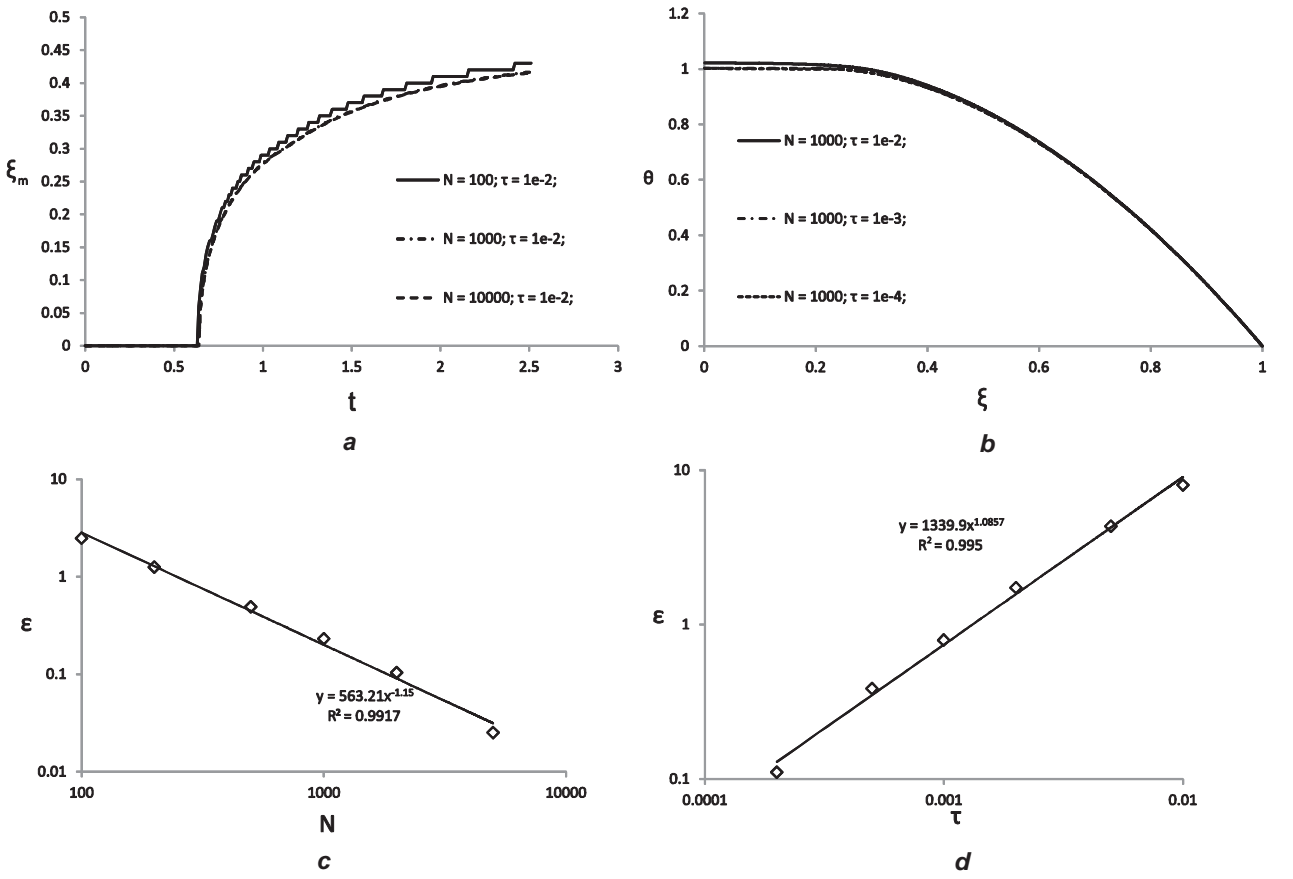


Рис. 1. *Зависимость численного решения от параметров сетки: a – положение фронта плавления для разных пространственных сеток; b – распределение температуры для разных временных сеток; c – зависимость погрешности численного решения от числа узлов пространственной сетки; d – зависимость погрешности решения от шага временной сетки*

Fig. 1. *Numerical solution vs grid settings: a – melting front position for different spatial grids; b – temperature distribution for different time grids; c – dependence of the numerical solution error on the spatial grid node number; d – dependence of the solution error on the time grid step*

Для того чтобы показать сходимость разностной схемы, были проведены расчеты для разных шагов пространственной и временной сетки. Целевой характеристикой является время расплавления образца. Кроме того, индикатором надкритических режимов является максимальная температура в образце на момент расплавления оболочки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Далее приводятся результаты расчетов для разных значений параметров *St*, *Bi*, *к* и *Q*, причем таким образом, чтобы тепловыделение *Q* заведомо превышало критическое значение, определяемое условием (15). Величина этого превышения определяет, при прочих равных, скорость движения фронта и время полного расплавления образца. Поэтому в дальнейшем удобно перейти к переменной $\Delta Q = Q - Q_{max}$. Естественно ожидать, что при $\Delta Q \to 0$ время расплавления τ_m стремится к бесконечности.

Расчетные зависимости времени расплавления от ΔQ и *St* при $к = 1$ представлены на рис. 2. Ожидаемо, что с ростом тепловыделения время расплавления уменьшается. В пределе больших *Q* время расплавления стремится к значению (18). При малых ΔQ зависимость времени расплавления довольно близко описывается логарифмическим законом:

$$\tau_m \sim - \ln \Delta Q. \qquad (39)$$

Такая зависимость хорошо аппроксимирует начальный участок кривых ($\Delta Q < 2$), давая правильное поведение в пределе $\Delta Q \to 0$ (это поведение соответствует первому слагаемому в (20)). При этом наклон линейных участков в таких координатах обратно пропорционален числу *St*. При малых *St* виден переход от логарифмической зависимости (20) к обратной пропорциональности (18).

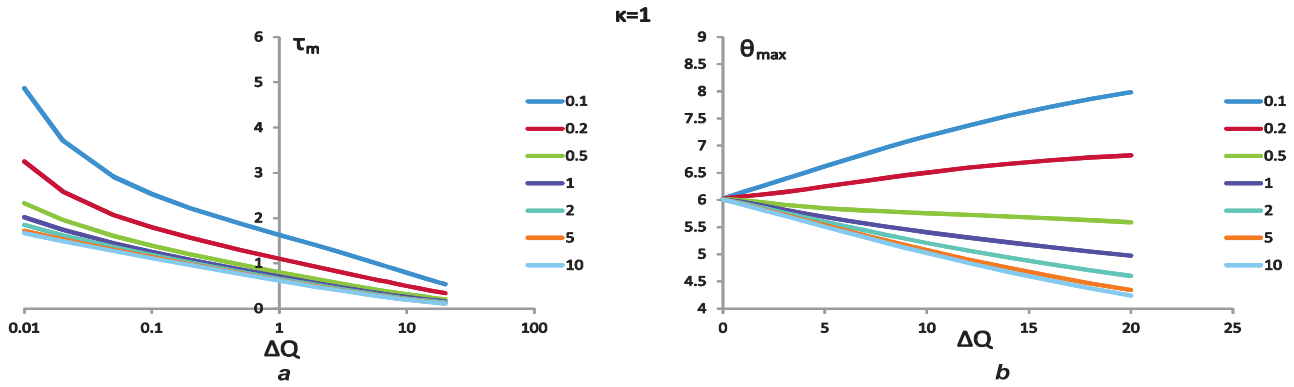


Рис. 2. *Зависимость времени расплавления (a) и максимальной температуры от интенсивности тепловыделения (b) при к = 1 (Bi = 10, Qmax = 20, ΔQ = Q – Qmax, числа на легенде – St)*
Fig. 2. *Melting time (a) and maximum temperature vs heat release intensity (b) at к = 1 (Bi = 10, Qmax = 20, ΔQ = Q – Qmax, St are the numbers in the legend)*

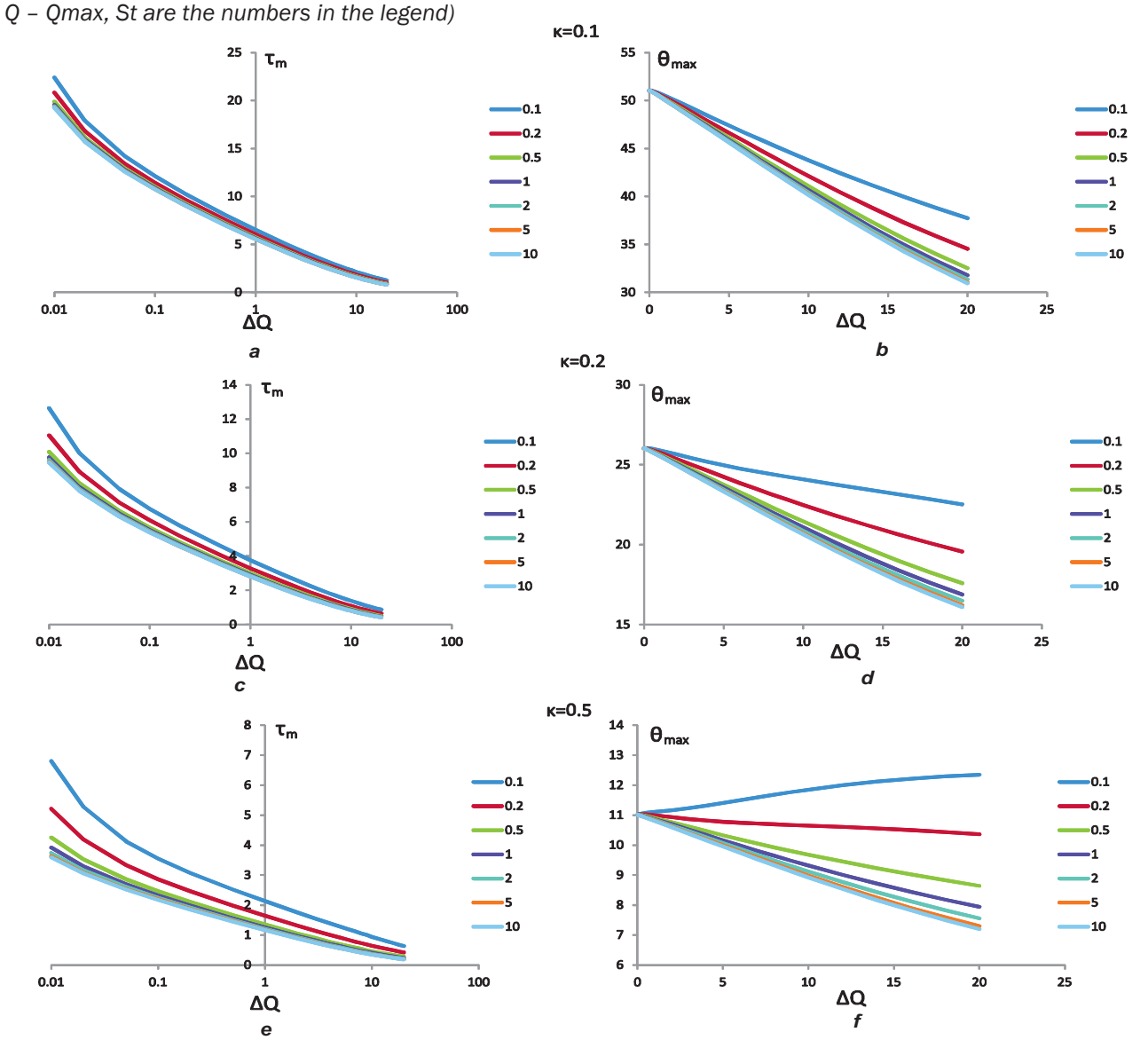


Рис. 3. *Зависимость времени расплавления и максимальной температуры от интенсивности тепловыделения при к < 1 (Bi = 10, Qmax = 20, ΔQ = Q – Qmax, числа на легенде – St): a – время расплавления при к = 0,1; b – максимальная температура при к = 0,1; c – время расплавления при к = 0,2; d – максимальная температура при к = 0,2; e – время расплавления при к = 0,5; f – максимальная температура при к = 0,5*
Fig. 3. *Melting time and maximum temperature vs heat release intensity at к < 1 (Bi = 10, Qmax = 20, ΔQ = Q – Qmax, St are the numbers in the legend): a – melting time at к = 0.1; b – maximum temperature at к = 0.1; c – melting time at к = 0.2; d – maximum temperature at к = 0.2; e – melting time at к = 0.5; f – maximum temperature at к = 0.5*

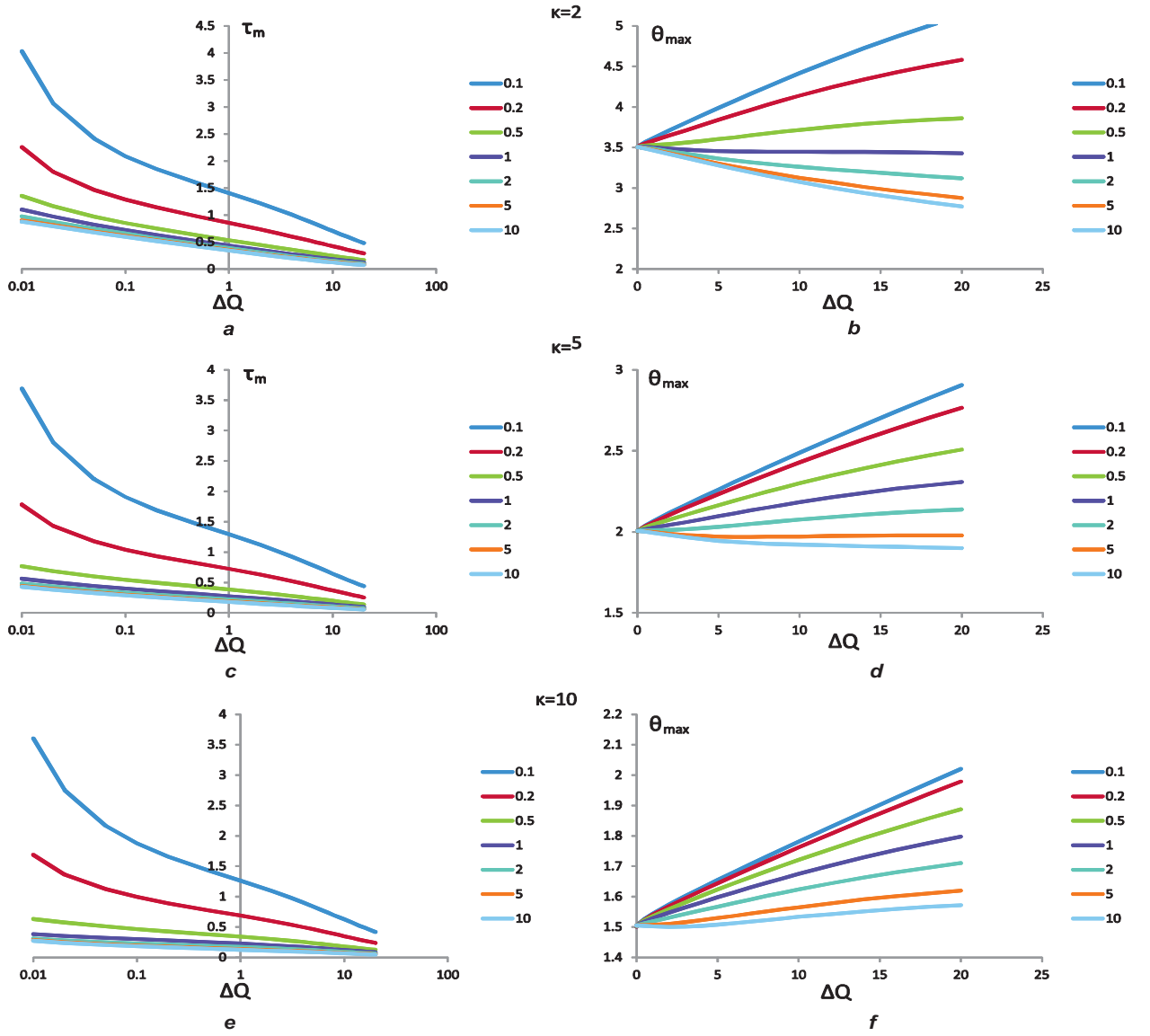


Рис. 4. *Зависимость времени расплавления и максимальной температуры от интенсивности тепловыделения при к > 1 (Bi = 10, Qmax = 20, ΔQ = Q – Qmax, числа на легенде – St): a – время расплавления при к = 2; b – максимальная температура при к = 2; c – время расплавления при к = 5; d – максимальная температура при к = 5; e – время расплавления при к = 10; f – максимальная температура при к = 10*

Fig. 4. *Melting time and maximum temperature vs heat release intensity at к > 1 (Bi = 10, Qmax = 20, ΔQ = Q – Qmax, St are the numbers in the legend): a – melting time at к = 2; b – maximum temperature at к = 2; c – melting time at к = 5; d – maximum temperature at к = 5; e – melting time at к = 10; f – maximum temperature at к = 10*

Интересно, что параметр существенно влияет на скорость расплавления образца. При малых *к* время расплавления слабо зависит от числа *St*, поскольку критическое значение Q_{max} довольно велико (см. рис. 3). При этом температура в центре образца в момент расплавления уменьшается с ростом *Q*: чем интенсивнее тепловыделение, тем за меньшее время происходит расплавление, а значит, центральная часть успевает прогреться до меньшей температуры. С ростом *к* происходит существенно расслоение кривых, особенно в области малых *ΔQ*, где можно наблюдать регулярный режим нагрева (см. рис. 4). При *к* = 0,5 наблюдается обращение зависимости максимальной температуры от интенсивности нагрева: для малых *St* (больших величин теплоты фазового перехода) появляется выраженный фронт плавления, при этом за счет его медленного движения центральная часть образца успевает прогреться до более высокой температуры. Этот эффект наблюдается все более ярко с дальнейшим ростом *к*. Повышение теплопроводности жидкой фазы способствует повышению те-

плового потока на фронте фазового перехода и увеличению его скорости. Лучший теплоперенос позволяет достичь меньшей температуры в центре образца в момент расплавления оболочки.

Можно рассматривать расплавление как результат конкуренции двух механизмов нагрева зоны плавления: за счет объемного тепловыделения и за счет теплопроводности. При больших значениях *Q* и *St* реализуется первый механизм: в этом случае время расплавления определяется скоростью прогрева и мало зависит от *St*. При малых *Q* и *St* скорость плавления уменьшается, тепловой поток на фронте плавления существенно зависит от соотношения теплопроводностей фаз.

Влияние числа *St* для всех случаев качественно повторяется для всех вариантов расчета: с ростом *St* время расплавления уменьшается, а температура образца растет. При этом наблюдается зависимость, которую можно ожидать из упрощенных формул (18) и (20):

$$\tau_m \sim \frac{1}{St} . \qquad (40)$$

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРИБЛИЖЕННЫХ ФОРМУЛ

Полученные ранее приближенные формулы не содержат отношения теплопроводностей фаз, что определенно говорит о неприменимости выбранных приближений. Тем не менее для некоторой области значений *κ* приближение может быть достаточно хорошим.

При плавлении коэффициент теплопроводности, как правило, уменьшается, но возникающая конвекция может увеличивать тепловой поток [14, 18].

Как видно из рис. 5, простейшая формула (17) дает скорее нижнюю границу для времени расплавления. Приближение (19) сходится к приближению (17) в пределе больших Δ*Q*, при этом дает слишком высокие значения для малых Δ*Q* по сравнению с расчетной зависимостью. Приближение (30) довольно плохо описывает расчетную кривую как при малых, так и при больших Δ*Q*. В узком диапазоне Δ*Q* порядка нескольких единиц приближения (17) и (30) дают близкие результаты, но этот факт оказывается больше совпадением.

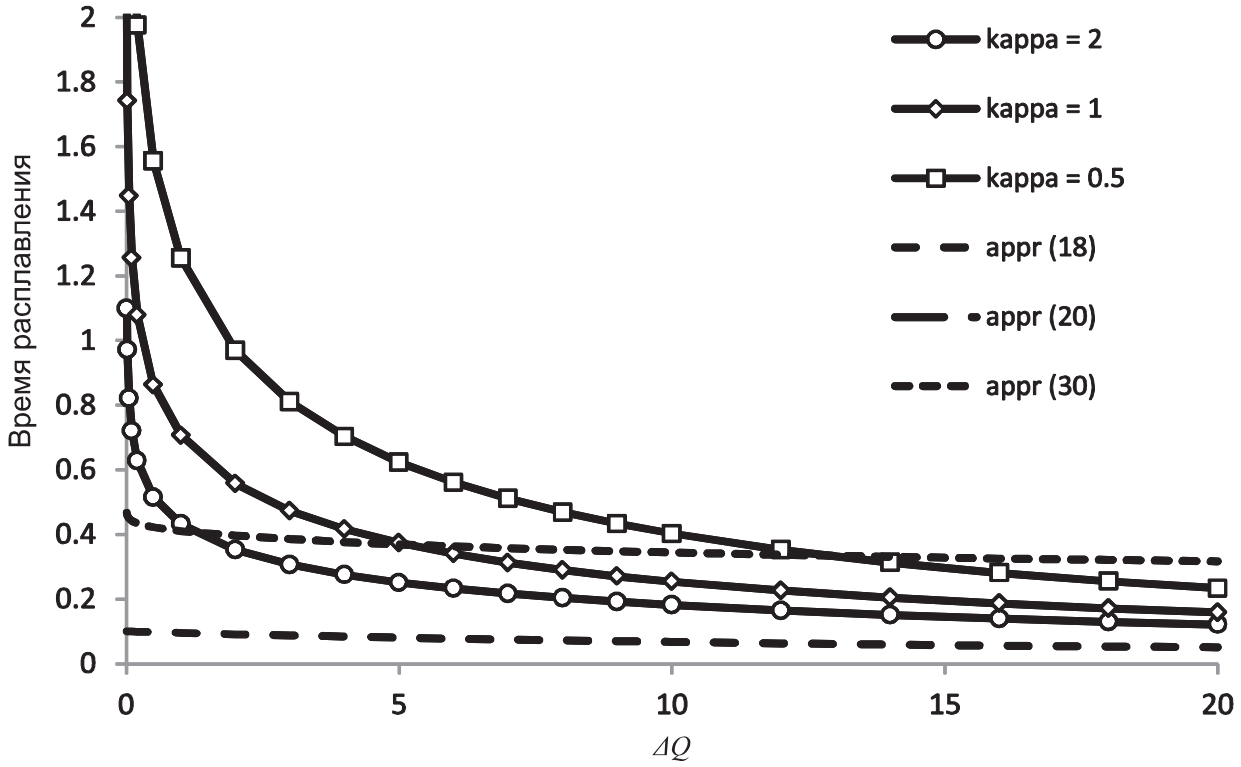


Рис. 5. *Сравнение результатов численного моделирования с приближениями: зависимость времени расплавления от интенсивности тепловыделения (Bi = 10, St = 1)*
Fig. 5. *Comparison of numerical simulation results with approximations: melting time vs heat release intensity (Bi = 10, St = 1)*

Отметим, что рассмотренная задача является модельной: в ней рассматривается нагрев образца из холодного состояния, в то время как более интересными с практической точки зрения могут быть переходные режимы при изменении тепловой нагрузки [14]. Теплофизические свойства материалов зависят от температуры, поэтому приведенный анализ относится только к условиям небольшого изменения абсолютной температуры, когда применимо приближение средних значений. В работе не рассматриваются лучистые потери теплоты, которые, впрочем, довольно просто учесть в рамках численной модели. В химических приложениях интересны постановки задачи с реагированием расплава, образованием новых фаз и движением расплава. Далее, в приложениях образец, как правило, имеет оболочку с отличающимися от содержимого теплофизическими свойствами, при этом само содержимое может быть многослойным. В некоторых случаях оболочка может быть проницаема для теплоносителя либо содержит другие элементы для активного охлаждения. Наконец, тепловыделение может быть функцией температуры [19, 20]. Все эти особенности требуют модификации модели, введения новых параметров и проведения отдельных расчетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследуется вопрос о скорости расплавления цилиндрического образца с однородным объемным тепловыделением. Расплавление возможно только при ограниченной скорости теплообмена между поверхностью образца и окружающей средой. Рассматриваются упрощенные (усредненные) постановки задачи, которые позволяют получить выражения для времени расплавления. Численное решение задачи Стефана с одним из вариантов энтальпийной схемы позволяет получить зависимость времени расплавления от параметров задачи. Расчеты показывают, что отношение теплопроводностей фаз существенным образом влияет на скорость плавления, при этом приближенные постановки задач упускают это влияние (хотя влияние других параметров качественно подтверждается). При плавлении за счет объемного тепловыделения происходит конкуренция между прогревом материала за счет теплопроводности и за счет тепловыделения, что приводит к появлению характерных особенностей, в том числе к сложной зависимости времени расплавления от интенсивности тепловыделения.

Список источников

1. Франк-Каменецкий Д.А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. Долгопрудный: Интеллект, 2008. 407 с. EDN: QKBWWN.
2. Bostandzhiyan S.A., Stolin A.M. The critical conditions of the thermal regime in a generalized couette flow // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 1969. Vol. 17. Iss. 1. P. 848–854. https://doi.org/10.1007/BF00828393. EDN: PPUFZJ.
3. 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.
4. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Yanovskiy L.S., Strizhak P.A. Physical and mathematical models of micro-explosions: achievements and directions of improvement // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 16. P. 6034. https://doi.org/10.3390/en16166034.
5. Crepeau J., Siahpush A. Approximate solutions to the Stefan problem with internal heat generation // Heat and Mass Transfer. 2008. Vol. 44. P. 787–794. https://doi.org/10.1007/s00231-007-0298-8.
6. Fetsov S.S., Lutsenko N.A. A novel computational model and OpenFOAM solver for simulating thermal energy storages based on granular phase change materials: advantages and applicability // Journal of Energy Storage. 2023. Vol. 65. P. 107294. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107294.
7. 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.
8. 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.
9. Ledakowicz S., Piddubniak O. The non-stationary heat transport inside a shafted screw conveyor filled with homogeneous biomass heated electrically // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 17. P. 6164. https://doi.org/10.3390/en15176164.
10. Ge Lichao, Liu Xiaoyan, Feng Hongcui, Jiang Han, Zhou Tianhong, Chu Huaqiang, et al. The interaction between microwave and coal: a discussion on the state-of-the-art // Fuel. 2022. Vol. 314. P. 123140. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123140.

11. Crepeau J.C., Siahpush A., Spotten B. On the Stefan problem with volumetric energy generation // Heat and Mass Transfer. 2009. Vol. 46. P. 119–128. https://doi.org/10.1007/s00231-009-0550-5.
12. Barannyk L., Crepeau J., Paulus P., Siahpush A. Fourier-Bessel series model for the Stefan problem with internal heat generation in cylindrical coordinates // Proceedings of the 26th International Conference on Nuclear Engineering ICONE26 (London, 22–26 July 2018). London: ASME, 2018. P. 81009. https://doi.org/10.1115/icone26-81009.
13. 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.
14. Crepeau J.C., Sakhnov A.Yu., Naumkin V.S. Stefan problem with internal heat generation: comparison of numerical modeling and analytical solution // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1369. P. 012025. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1369/1/012025.
15. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
16. Caldwell J., Kwan Y.Y. Numerical methods for one-dimensional Stefan problems // Communications in Numerical Methods in Engineering. 2004. Vol. 20. No. 7. P. 535–545. https://doi.org/10.1002/cnm.691.
17. Xu Minghan, Akhtar S., Zueter A.F., Alzoubi M.A., Sushama L., Sasmito A.P. Asymptotic analysis of a two-phase Stefan problem in annulus: application to outward solidification in phase change materials // Applied Mathematics and Computation. 2021. Vol. 408. P. 126343. https://doi.org/10.1016/j.amc.2021.126343.
18. Crepeau J., Siahpush A.S. Solid–liquid phase change driven by internal heat generation // Comptes Rendus Mecanique. 2012. Vol. 340. Iss. 7. P. 471–476. https://doi.org/10.1016/j.crme.2012.03.004.
19. Zhang Guangxu, Shen Wei, Wei Xuezhe. Lithium-ion battery thermal safety evolution during high-temperature nonlinear aging // Fuel. 2024. Vol. 362. P. 130845. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130845.
20. Li He, Zheng Chunshan, Lu Jiexin, Tian Li, Lu Yi, Ye Qing, et al. Drying kinetics of coal under microwave irradiation based on a coupled electromagnetic, heat transfer and multiphase porous media model // Fuel. 2019. Vol. 256. P. 115966. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115966.

References

1. Frank-Kamenetskii D.A. *Fundamentals of macrokinetics. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics*. Dolgoprudnyj: Intellekt; 2008, 407 p. EDN: QKBWWN. (In Russ.).
2. Bostandzhiyan S.A., Stolin A.M. The critical conditions of the thermal regime in a generalized couette flow. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1969;17(1):848-854. https://doi.org/10.1007/BF00828393. EDN: PPUFZJ.
3. 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.
4. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Yanovskiy L.S., Strizhak P.A. Physical and mathematical models of micro-explosions: achievements and directions of improvement. *Energies.* 2023;16(16):6034. https://doi.org/10.3390/en16166034.
5. Crepeau J., Siahpush A. Approximate solutions to the Stefan problem with internal heat generation. *Heat and Mass Transfer*. 2008;44:787-794. https://doi.org/10.1007/s00231-007-0298-8.
6. Fetsov S.S., Lutsenko N.A. A novel computational model and OpenFOAM solver for simulating thermal energy storages based on granular phase change materials: advantages and applicability. *Journal of Energy Storage*. 2023;65:107294. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107294.
7. 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.
8. 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.
9. Ledakowicz S., Piddubniak O. The non-stationary heat transport inside a shafted screw conveyor filled with homogeneous biomass heated electrically. *Energies*. 2022;15(17):6164. https://doi.org/10.3390/en15176164.
10. Ge Lichao, Liu Xiaoyan, Feng Hongcui, Jiang Han, Zhou Tianhong, Chu Huaqiang, et al. The interaction between microwave and coal: a discussion on the state-of-the-art. *Fuel.* 2022;314:123140. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123140.
11. Crepeau J.C., Siahpush A., Spotten B. On the Stefan problem with volumetric energy generation. *Heat and Mass Transfer.* 2009;46:119-128. https://doi.org/10.1007/s00231-009-0550-5.
12. Barannyk L., Crepeau J., Paulus P., Siahpush A. Fourier-Bessel series model for the Stefan problem with internal heat generation in cylindrical coordinates. In: *Proceedings of the 26th International Conference on Nuclear Engineering ICONE26*. 22–26 July 2018, London. London: ASME; 2018, p. 81009. https://doi.org/10.1115/icone26-81009.
13. 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;221:119849. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119849.

14. Crepeau J.C., Sakhnov A.Yu., Naumkin V.S. Stefan problem with internal heat generation: comparison of numerical modeling and analytical solution. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1369:012025. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1369/1/012025.
15. Lykov A.V. *Analytical heat diffusion theory*. Moscow: Vysshaya shkola; 1967, 600 p. (In Russ.).
16. Caldwell J., Kwan Y.Y. Numerical methods for one-dimensional Stefan problems. *Communications in Numerical Methods in Engineering*. 2004;20(7):535-545. https://doi.org/10.1002/cnm.691.
17. Xu Minghan, Akhtar S., Zueter A.F., Alzoubi M.A., Sushama L., Sasmito A.P. Asymptotic analysis of a two-phase Stefan problem in annulus: application to outward solidification in phase change materials. *Applied Mathematics and Computation*. 2021;408:126343. https://doi.org/10.1016/j.amc.2021.126343.
18. Crepeau J., Siahpush A.S. Solid–liquid phase change driven by internal heat generation. *Comptes Rendus Mecanique*. 2012;340(7):471-476. https://doi.org/10.1016/j.crme.2012.03.004.
19. Zhang Guangxu, Shen Wei, Wei Xuezhe. Lithium-ion battery thermal safety evolution during high-temperature nonlinear aging. *Fuel*. 2024;362:130845. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130845.
20. Li He, Zheng Chunshan, Lu Jiexin, Tian Li, Lu Yi, Ye Qing, et al. Drying kinetics of coal under microwave irradiation based on a coupled electromagnetic, heat transfer and multiphase porous media model. *Fuel.* 2019;256:115966. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115966.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Донской Игорь Геннадьевич,
к.т.н.,
старший научный сотрудник лаборатории термодинамики,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
✉ donskoy.chem@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2309-8461

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Igor G. Donskoy,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of the Thermodynamics Laboratory,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
✉ donskoy.chem@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2309-8461

Вклад автора

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

Contribution of the author

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

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 08.04.2024 г.; принята к публикации 12.05.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 01.03.2024; approved after reviewing 08.04.2024; accepted for publication 12.05.2024.

iPolytech Journal 2024. Т. 28. № 2. 303-319 ISSN 2782-4004 (print)
2024;28(2):303-319 ISSN 2782-6341 (online)

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья
УДК 621.313-57:621.313.3.025.3-78:621.313.333.2
EDN: QGNDOD
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-303-319

Прототип автоматики контроля успешности пуска асинхронных двигателей в локальных системах энергоснабжения

И.В. Дулов[1]✉, А.Г. Фишов[2]

[1,2]*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

Резюме. Цель – разработка и испытания прототипа интеллектуальной автоматики контроля успешности пусков асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором на физической модели локальной системы энергоснабжения. В прототипе реализован поэтапный прогностический контроль процесса, на каждом из которых на основе моделей критических параметров двигателя и питающей сети проверяются частичные условия его успешности. Разработка базируется на использовании программного комплекса LabVIEW, методов параметрической идентификации, физического моделирования, фильтрации аналоговых и цифровых сигналов, теории автоматического регулирования, математического анализа и статистики. Экспериментально доказана возможность и эффективность предиктивного контроля успешности пуска асинхронного двигателя в локальных системах энергоснабжения по величине, скорости и характеру изменения режимных параметров статорных обмоток двигателя без непосредственного измерения частоты вращения его вала. Показано, что погрешность разработанных моделей для определения критических параметров режима, определяющих успешность пуска асинхронного двигателя, не превышает 4%. Установлено, что погрешность прогностической оценки продолжительности пуска асинхронного двигателя не превышает 14%. Показано, что в 91% экспериментов с пусками асинхронного двигателя на физической модели локальной системы энергоснабжения при вариации схемно-режимных условий прототип автоматики достоверно идентифицировал успешность/неуспешность пуска двигателя на разных этапах процесса. При выявлении неуспешности прототип обеспечивал прерывание пусков на ранних стадиях. В результате проведенных исследований случаев отсутствия выдачи автоматикой команды на прерывание процесса пуска в условиях его неуспешности не зафиксировано. Таким образом, применение интеллектуальной автоматики контроля успешности пусков асинхронных двигателей в локальных системах энергоснабжения позволит снизить вероятности повреждения двигателей и оборудования питающих сетей, сохранить ресурс их работоспособности и повысить надежность электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, прямой пуск, контроль успешности пуска, локальная система энергоснабжения, критические параметры режима, автоматика, моделирование

Для цитирования: Дулов И.В., Фишов А.Г. Прототип автоматики контроля успешности пуска асинхронных двигателей в локальных системах энергоснабжения // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 303–319. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-303-319. EDN: QGNDOD.

POWER ENGINEERING

Original article

Prototype of an automatic system for monitoring the success of starting asynchronous motors in local power supply systems

Ilya V. Dulov[1]✉, Alexander G. Fishov[2]

[1,2]*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

Abstract. The present study aims to develop and test a prototype of an intelligent automatic system for monitoring the success of starting asynchronous motors with a squirrel-cage rotor using the physical model of a local power supply system. The prototype implements stepwise predictive control, which checks the partial conditions of the process success at each step based on critical parameter models of both the engine and the supply network. The development is based on the use of the LabVIEW software suite, parametric identification methods, physical simulation, analog and digital signal filtering, auto-regulation theory, mathematical analysis, and statistics. The study experimentally proved the possibility and effectiveness of predictive start-up control for asynchronous motors of local power supply systems in terms of the magnitude, rate, and pattern of variations in the operating parameters

© Дулов И.В., Фишов А.Г., 2024

of motor stator windings without a direct measurement of the shaft velocity. The error of the developed models for determining the critical mode parameters, affecting the success of starting the asynchronous motor, is demonstrated to be less or equal to 4%. The error in the predictive estimate of the start-up duration for an asynchronous motor did not exceed 14%. It is demonstrated that in 91% of experiments with the start-ups of an asynchronous motor using the physical model of a local power supply system under the variations of circuit-mode conditions, the automatic system prototype reliably identified the success/failure of the engine start at various stages of the process. If a failure was detected, the prototype ensured the interruption of start-ups in the early stages. The studies revealed no cases of non-issuance by the automatic system of a command to interrupt the start-up process under the conditions of its failure. Therefore, intelligent automatic systems for monitoring the success of starting asynchronous motors in local power supply systems will reduce the likelihood of damage to motors and equipment of power supply networks, preserve their serviceability, and improve the reliability of power supply to consumers.

Keywords: induction motor, direct-on-line-start, start-up success monitoring, local power supply system, critical mode parameters, automatic equipment, modeling

For citation: Dulov I.V., Fishov A.G. Prototype of an automatic system for monitoring the success of starting asynchronous motors in local power supply systems. *iPolytech Journal.* 2024;28(2):303-319. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-303-319. EDN: QGNDOD.

ВВЕДЕНИЕ

Современная отечественная энергетическая отрасль развивается по пути декарбонизации, диджитализации и децентрализации. Декарбонизация предполагает снижение доли углеродного топлива при производстве электроэнергии и поэтапный переход к развитию и применению возобновляемой энергетики. Диджитализация (цифровая трансформация) предполагает переход к цифровым технологиям с новыми принципами и способами интеллектуального управления объектами. Под децентрализацией понимается развитие распределенной малой генерации (МГ) и переход от централизованного управления режимами энергосистем с иерархической структурой к децентрализованному (локальному) [1]. В результате преобразований будут формироваться интеллектуальные электроэнергетические системы SmartGrid с открытой архитектурой, базирующиеся на использовании инновационных технологий и решений.

Децентрализация энергоснабжения приводит к появлению значительного количества локальных систем энергоснабжения на базе новых источников электрической и тепловой энергии малой мощности или создаваемых путем реконструкции котельных с их преобразованием в когенерационные электростанции [2, 3]. Объекты с МГ могут быть нескольких видов: изолированные от внешних сетей, интегрированные с внешней сетью без возможности автономной работы и гибридные сбалансированные локальные системы энергоснабжения (ЛСЭ) с возможностями работы как в составе внешней сети, так и автономно [4, 5]. Проблема пуска крупных асинхронных двигателей наиболее остро возникает в автономных режимах ЛСЭ, когда генераторные агрегаты должны самостоятельно обеспечивать возможность пусков асинхронных двигателей (АД) [6], при этом мощности суммарной генерации и крупных двигателей могут быть соизмеримыми.

Пуск АД оказывает сильное влияние на режим электрической сети, нарушая балансы активной и реактивной мощностей в ЛСЭ со значительными изменениями напряжения и частоты. Возникающие отклонения режимных параметров способны приводить к появлению аварийных режимов с каскадной потерей устойчивости работающих двигателей и/или отключением генераторных агрегатов с последующей потерей энергоснабжения всего энергорайона.

Следует учитывать, что в качестве первичных двигателей генераторов часто применяются газопоршневые (ГПУ) или газотурбинные (ГТУ) установки [7], крайне чувствительные к резким набросам/сбросам мощности, чувствительны к длительным отклонениям частоты от номинальной. Работа на пониженной частоте приводит к появлению дополнительной вибрации лопаток/поршней, которая может повредить двигатель энергоустановки [8].

Для снижения влияния пусков АД на питающую сеть разработан ряд способов [9–11], которые разделяются на две группы: классические (трансформаторный, реостатный и т.д.); на базе силовой электроники (частотный и плавный пуск). Для применения классических способов необходимы специализированные схемы подключения и дополнительное оборудование, комбинация которых

позволяет обеспечить его успешность путем создания подходящих условий для гарантированного пуска, зачастую без механической нагрузки. Для второй группы способов пуска требуется дополнительное дорогостоящее оборудование на базе силовой электроники, которое позволяет управлять процессом включения АД.

Контроль успешности пуска АД в представленных способах осуществляется либо элементами управления преобразовательных устройств (происходит опосредованно, например, при превышении уставки по предельному потребляемому току преобразовательное устройство отключается), либо при помощи визуального контроля (непосредственного наблюдения за скоростью при пуске двигателя). При этом отключение АД от ПС производится только по факту отклонения подконтрольных параметров (напряжение, ток, частота, продолжительность и т.д.) от допустимых значений без прогноза их изменения в процессе пуска, что является недостатком существующих способов.

Малозатратным средством обеспечения эффективности применения прямого пуска АД в ЛСЭ может служить специальная автоматика прогностического контроля его успешности с противоаварийным прерыванием при необходимости. Ее применение позволит предотвращать повреждение подконтрольного двигателя, оборудования ПС, а также сохранять их ресурс работоспособности, прерывая неуспешные пуски АД на ранних стадиях.

Ранее были обоснованы и в [12] представлены условия успешности пуска АД в ЛСЭ, модели прогностической оценки его успешности, а также результаты испытания реализующих их алгоритма способа поэтапного контроля на цифровой модели ЛСЭ.

С целью получения научно-технического задела (НТЗ), достаточного для перехода к стадии опытно-конструкторских работ по созданию опытного образца, в данной работе представлены результаты разработки и испытания на физической модели ЛСЭ прототипа автоматики контроля успешности пусков АД. При этом под прототипом понимается устройство, реализующее базовую функциональность будущего серийного изделия, достаточную для оценки его работоспособности и эффективности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Условия и работа прототипа автоматики прогностического контроля успешности пуска АД. Факторы, влияющие на успешность пуска АД в ЛСЭ, могут быть разделены на объектные и системные. Объектные, зависящие от параметров подконтрольного двигателя, определяют критические параметры для АД в необходимых и достаточных условиях успешности пуска. Системные, зависящие от параметров схемы энергоснабжения, определяют критические параметры для ПС, а также ее фактическое состояние в необходимых и достаточных условиях успешности пуска.

Под условиями успешности пуска понимаются требования к режиму ЛСЭ, при соблюдении которых за включением контролируемого АД последует его переход из статического состояния в установившееся с рабочей скоростью вращения, не приводящий к недопустимому отклонению режимных параметров с последующим нарушением устойчивой работы нагрузки или отключению генерирующих агрегатов. Соблюдение необходимых и достаточных условий в процессе пуска АД будет свидетельствовать о его успешности [13].

К условиям успешности следует отнести:

1. Допустимость частоты в ЛСЭ. Частота в ЛСЭ не должна выходить за допустимые границы, при нарушении которых происходит отключение генерирующих агрегатов. При этом она должна быть достаточна для успешного пуска АД.

2. Допустимость снижения напряжения в сети и его продолжительности для контролируемого двигателя и прочей двигательной нагрузки. При пуске АД возникает дополнительное падание напряжения в элементах сети, снижающее узловые напряжения потребителей. Работа на пониженном напряжении приводит к увеличению длительности разворота нагруженного двигателя и, как следствие, увеличению продолжительности воздействия пускового тока на тело статора и ротора. Причем чем продолжительнее процесс пуска, тем выше вероятность потери устойчивой работы смежных двигателей с последующим возникновением аварийного режима в ЛСЭ. В результате напряжение в процессе пуска должно быть выше критического, а также достаточным для обеспечения допустимой продолжительности пуска.

Работа разработанного прототипа устройства основана на способе поэтапного контроля соблюдения условий успешности пуска АД и поясняется схемой подключения двигателя к питающей сети с устройством контроля успешности пуска (рис. 1), структурой процесса контроля успешности пуска АД (рис. 2) [14].

Структурная схема рис. 1 содержит: 1 – ПС; 2 – измерительный блок напряжения (ИБН); 3 – коммутационный аппарат (КА); 4 – блок управления (БУ) пуском АД, в который поступает внешняя команда (ВК) на включение или отключение двигателя; 5 – измерительный блок тока (ИБТ); 6 – АД.

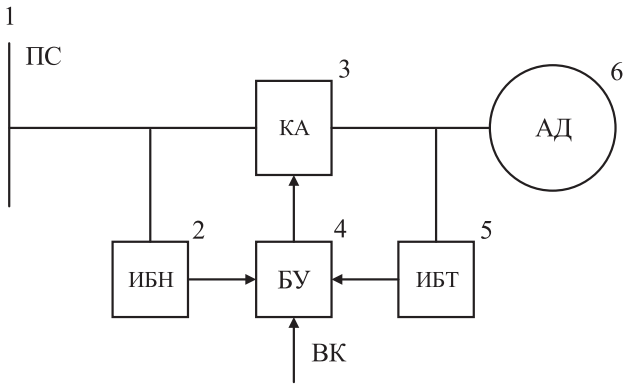


Рис. 1. *Схема подключения двигателя с устройством контроля успешности пуска*
Fig. 1. *Connection diagram for a motor with a start-up success monitoring device*

Процесс контроля успешности пуска АД (рис. 2) разделен на пять этапов: 1 – блокировка пуска двигателя; 2 – экспресс оценка его допустимости по необходимым условиям; 3 – оценка допустимости по достаточным условиям; 4 – оценка допустимости длительности пуска; 5 – запрет повторного включения.

Работа устройства осуществляется следующим образом: в момент времени (А) АД находится в режиме ожидания ВК на включение. После ее получения на этапе 1 до момента (В) БУ производится оценка возможности пуска АД по данным ИКН. Напряжение в узле нагрузки и частота питающей сети для выполнения первого прямого пуска АД должны удовлетворять данным условиям:

$$U_0 > U_{доп};$$
$$f_0 > f_{доп},$$

где U_0 – напряжение на шинах АД до пуска, В; $U_{доп}$ – минимально допустимое напряжение в узле нагрузки, В; f_0 – значение частоты до пуска двигателя, Гц; $f_{доп}$ – минимально допустимая частота питающей сети, Гц.

Для последующих пусков совместно учитываются следующие условия:

$$U_0 > U_{кр};$$

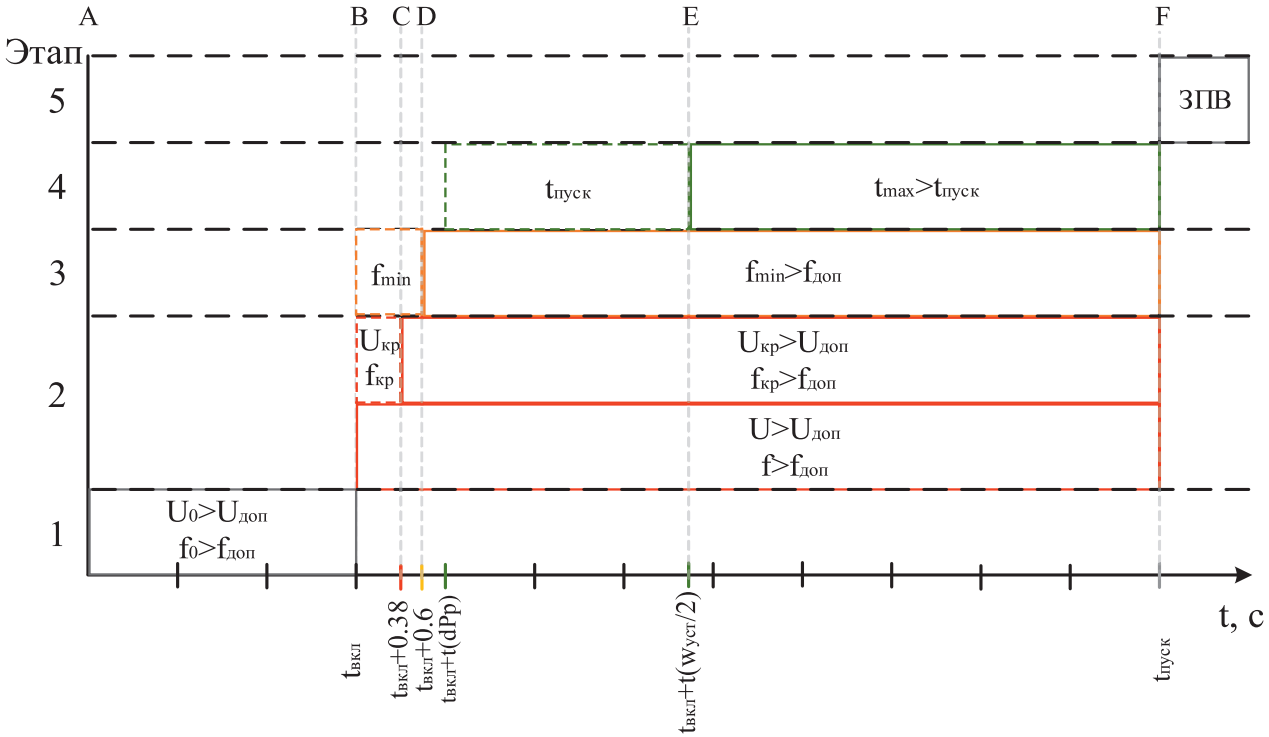


Рис. 2. *Структура процесса контроля успешности пуска двигателя*
Fig. 2. *Structure of the motor start-up success monitoring*

$$f_{кр} > f_0 > f_{min},$$

где $U_{кр}$ – минимальное напряжение для успешного пуска АД, В; $f_{кр}$ – предельное значение частоты в сети для успешного пуска АД, Гц; f_{min} – предельно допустимое минимальное значение частоты в сети по условию срабатывания технологической автоматики генерирующих агрегатов, Гц.

При соблюдении условий успешности до пуска БУ разрешает исполнение команды на включение КА, запускается процесс прямого пуска двигателя. После включения с момента времени (В) БУ начинает формировать базу ретроспективных данных о значении частоты в ЛСЭ для прогноза ее минимального значения на 3 этапе и рассчитывать угловую скорость вращения ротора АД. Угловая скорость вращения ротора АД определяется из уравнения движения ротора следующим образом [15]:

$$\omega_2 = \sum_{i=0}^{n} \frac{(M_{эмi} - M_{сопрti}) w_{ном}}{M_{ном} \cdot T_j} \Delta t_i$$

где $M_{эм}$ – электромагнитная мощность АД, Н·м; $M_{ном}$ – номинальный момент АД, Н·м; $M_{сопрт}$ – момент сопротивления приводного механизма на валу АД, Н·м; $w_{ном}$ – номинальная угловая скорость магнитного поля статора АД, рад/с; T_j – постоянная времени нагруженного ротора АД, с; Δt – интервал дискретизации БУ, с; ω_2 – угловая скорость вращения ротора АД, рад/с.

Расчет скорости вращения ротора АД заканчивается по достижении ее установившегося значения.

При наличии ретроспективных данных момент сопротивления приводного механизма принимается равным электромагнитному моменту в нормальном квазиустановившемся режиме, предшествующем текущему пуску двигателя, в противном случае – номинальному.

На этапе 2 БУ известным методом определяет параметры математической модели АД и критические значения параметров (напряжения и частоты) режима питающей сети для успешного пуска двигателя, проверяет выход параметров за критические и нормативно допустимые значения, при выходе за нормативно допустимые значения отключает двигатель.

Определение электрических параметров математической модели АД производится по методу наименьших квадратов по выражениям [16]:

$$R_1 = R_2' = \frac{\sum(P \cdot I^2)}{6\sum I^4};$$

$$X_1 = X_2' = \frac{\sum(Q \cdot I^2)}{6\sum I^4},$$

где – X_1 реактанс статора, Ом; x_2' – приведенный к статору реактанс ротора, Ом; R_1 – активное сопротивление статора, Ом; R_2' – приведенное к статору активное сопротивление ротора, Ом; P – активная мощность, потребляемая двигателем, Вт; R_1 – реактивная мощность, потребляемая двигателем, вар; I – действующее значение фазного тока двигателя, А.

Критическое напряжение определяется по выражению [17, 18]:

$$U_{кр} = \sqrt{\frac{M_{сопрт}(X^2 + R^2) w_c}{R_2'}},$$

где X – суммарный реактанс ротора и статора, Ом; R – суммарное активное сопротивление ротора и статора, Ом; w_c – угловая скорость магнитного поля статора, рад/с.

Критическая частота для пуска АД определяется по следующему выражению:

$$X^2 \frac{w^3}{w_{ном}^2} + R^2 w - \frac{U^2 R_2'}{M_{сопрт}} = 0,$$

где W – критическая угловая скорость магнитного поля статора для успешного пуска АД, рад/с.

В момент (С) БУ проверяет соблюдение следующих условий:

$$U > U_{доп}; \quad (1)$$

$$f > f_{доп}; \quad (2)$$

$$U > U_{кр}; \quad (3)$$

$$f < f_{кр}, \quad (4)$$

где f – значение частоты при пуске двигателя, Гц; U – напряжение на шинах АД при пуске, В.

На этапе 3 БУ по ретроспективным данным производит прогностический расчет

квазиустановившегося значения частоты с учетом работы регуляторов скорости генерирующих агрегатов путем экстраполяции зависимостей частоты от времени, характер изменения которой описывается аппроксимирующей функций [19]:

$$f = f_{рез} + (f_0 - f_{рез})e^{\alpha t}, \quad (5)$$

где f_0 – частота ПС на момент пуска, Гц; $f_{рез}$ – минимальное значение частоты ПС при пуска АД, Гц; α – декремент затухания частоты, о.е.; t – время относительно начала определения результирующего значения частоты при пуске АД, с; f – фактическое значение частоты ПС, Гц.

Минимальное значение частоты сети при пуске АД определяется по выражению (5):

$$f_{\text{рез}} = \frac{\frac{1}{4}\alpha^3 f_0(a_4) + \alpha^2 f_0(a_3)}{\frac{1}{4}\alpha^3(a_4) + \alpha^2(a_3) + \alpha(a_2)} +$$

$$+ \frac{\alpha(\frac{3}{2} f_0(a_2) - \frac{1}{2}(b_2)) + c_1}{\frac{1}{4}\alpha^3(a_4) + \alpha^2(a_3) + \alpha(a_2)},$$

в котором

$$\alpha = -\frac{2(a_3 c_1 + a_2 c_2)}{(a_4 c_1 + a_3 c_2)},$$

где: $a_1 = \sum t$; $a_2 = \sum t^2$; $a_3 = \sum t^3$; $a_4 = \sum t^4$; $b_2 = \sum f \cdot t$; $c_1 = f_0(a_1) - (b_1)$; $c_1 = f_0(a_1) - (b_1)$; $c_2 = (b_2) - f_0(a_2)$.

Значение напряжения с учетом действия регуляторов возбуждения принимается равным фактическому на момент окончания зондирующего интервала.

В момент (D) БУ выполняет проверку соблюдения условий (1)–(4) с учетом влияния регуляторов генерирующих агрегатов, а также следующего условия:

$$f_{рез} > f_{min}. \quad (6)$$

На этапе 4 БУ определяет прогностическую длительность пуска и знак скорости изменения потребляемой активной мощности, при выявлении положительного значения которой по экстраполяции зависимости угловой скорости вращения ротора от времени определяет продолжительность разгона до нормальной установившейся скорости, определяемой в соответствии со значением момента сопротивления и электрическими параметрами двигателя. При выявлении устойчивого знака скорости изменения активной мощности производит расчет продолжительности пуска:

$$t_{пуск} = \frac{\ln(\frac{\omega_{уст}}{\omega_0})\sum t^2}{\sum \ln(\omega_2)t - \ln(\omega_0)\sum t},$$

где $t_{пуск}$ – время, за которое двигатель достигнет нормальных рабочих оборотов, с; $\omega_{уст}$ – значение угловой скорости ротора двигателя, соответствующее установившемуся режиму при заданном моменте сопротивления, рад/с; ω_0 – значение угловой скорости ротора на момент выявления устойчивого разгона двигателя, рад/с; ω_2 – текущая угловая скорость ротора, определяемая исходя из величины небаланса моментов двигателя, рад/с.

Для получения достоверного значения продолжительности пуска АД интервал ретроспективы должен соответствовать времени от выявления устойчивого знака скорости изменения активной мощности до достижения ротором двигателя половины расчетной установившейся угловой скорости. При снижении количества ретроспективных данных возрастает погрешность определения продолжительности пуска двигателя.

В момент (E) в БУ выполняется проверка допустимости длительности пуска АД,

$$t_{пуск} < t_{max},$$

где t_{max} – максимально допустимое время пуска АД по условию допустимости снижения напряжения в смежных нагрузочных узлах или по условию предельного термического воздействия, с.

На этапе 5 до момента времени (F) БУ находится в режиме ожидания команды на запрет повторного пуска (ЗПВ) двигателя для предотвращения бесконечности циклов пуска АД или исключения включения после принудительного основа.

При несоблюдении условий успешности пуска АД в представленные моменты БУ выдает команду на отключение двигателя с последующим запретом повторного включения двигателя без улучшения условий его пуска.

Техническая и программная реализация прототипа устройства контроля успешности пусков асинхронного двигателя в локальных системах энергоснабжения

1. Аппаратные средства.

Прототип автоматики реализован на процессорном блоке RAPTOR-x86, являющемся специализированной аппаратной платформой для построения устройств противоаварийной автоматики и исполнения технологических алгоритмов, а также дополнительными устройствами расширения, осуществляющими информационный обмен с БУ через интерфейс RS-485 по специализированному протоколу:

1) трехканальный модуль ввода аналоговых сигналов от цепей тока REXT-I3, предназначенный для измерения его мгновенных значений во вторичных цепях трансформаторов тока (ТТ) на 1 А и 5 А;

2) трехканальный модуль ввода аналоговых сигналов от цепей напряжения REXT-U8, предназначенный для измерения его мгновенных значений во вторичных цепях трансформаторов напряжения (ТН) на 100 В.

3) модуль вывода дискретных сигналов REXT-DO220 с коммутационной способностью контактов при напряжении 220 В постоянного тока 0,2 А, предназначенный для управления состоянием выключателя АД.

2. Программная реализация алгоритмов контроля успешности пуска АД.

Алгоритм контроля успешности пуска АД на RAPTOR-x86, оснащенном процессорной платформой Intelx86 и операционной системой (ОС) Windows 10, был реализован в среде разработки Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench (LabVIEW) с применением специализированного драйвера, позволяющего обмениваться сигналами с модулями расширения через LabVIEW в обход процессов и процедур ОС для повышения быстродействия БУ.

Программное обеспечение (ПО) в среде разработки LabVIEW состоит из двух частей: пользовательской и управляющей. На рис. 3 приведен пользовательский интерфейс ПО, на котором располагаются: 1 – переключатель, изменение положения которого приводит к инициализации алгоритма автоматики; 2 – световые индикаторы для визуального контроля критерия (критериев), по которому (которым) произведено прерывание пуска АД; 3 – поля для вывода фактических параметров режима; 4 – поля для ввода минимально допустимых значений напряжения и частоты в ЛСЭ, а также интервала поиска оптимального момента включения АД; 5 – поля для вывода критических параметров режима; 6 – поля для ввода электрических и механических параметров АД; 7 – окна с осциллограммами действующего напряжения и частоты; 8 – поле для ввода частоты дискретизации БУ. На данной стадии разработки устройства контроля успешности пусков введено допущение, что электрические параметры АД заведомо известны и заданы, параметрическая идентификация двигателя не требуется.

Управляющая программа реализована на языке C++ с применением функциональных блоков LabVIEW в соответствии с алгоритмом контроля успешности пусков АД в ЛСЭ рис. 4 с введением дополнительных алгоритмов определения действующих значений тока, напряжения, фазы между ними, активной и реактивной мощностей, а также частоты ПС. В табл. 1 приведены переменные алгоритма контроля успешности пуска АД (рис. 4).

По сути, ПО состоит из 10 блоков:

1. Блок расчета действующего значения напряжения, его частоты и фазы относительно опорного сигнала RAPTOR на основе мгновенных значений напряжения фазы А.

2. Блок расчета действующего значения тока, его частоты и фазы относительно опорного сигнала RAPTOR на основе мгновенных значений тока фазы А.

3. Блок расчета активной и реактивной мощностей.

4. Блок реализации алгоритма 1-го этапа контроля успешности пуска АД, в котором оценивается нормальность режимных параметров на интервале 5 с до пуска с возможностью включения двигателя при их соответствии.

5. Блок реализации 1-й части алгоритма 2-го этапа контроля успешности пуска АД,

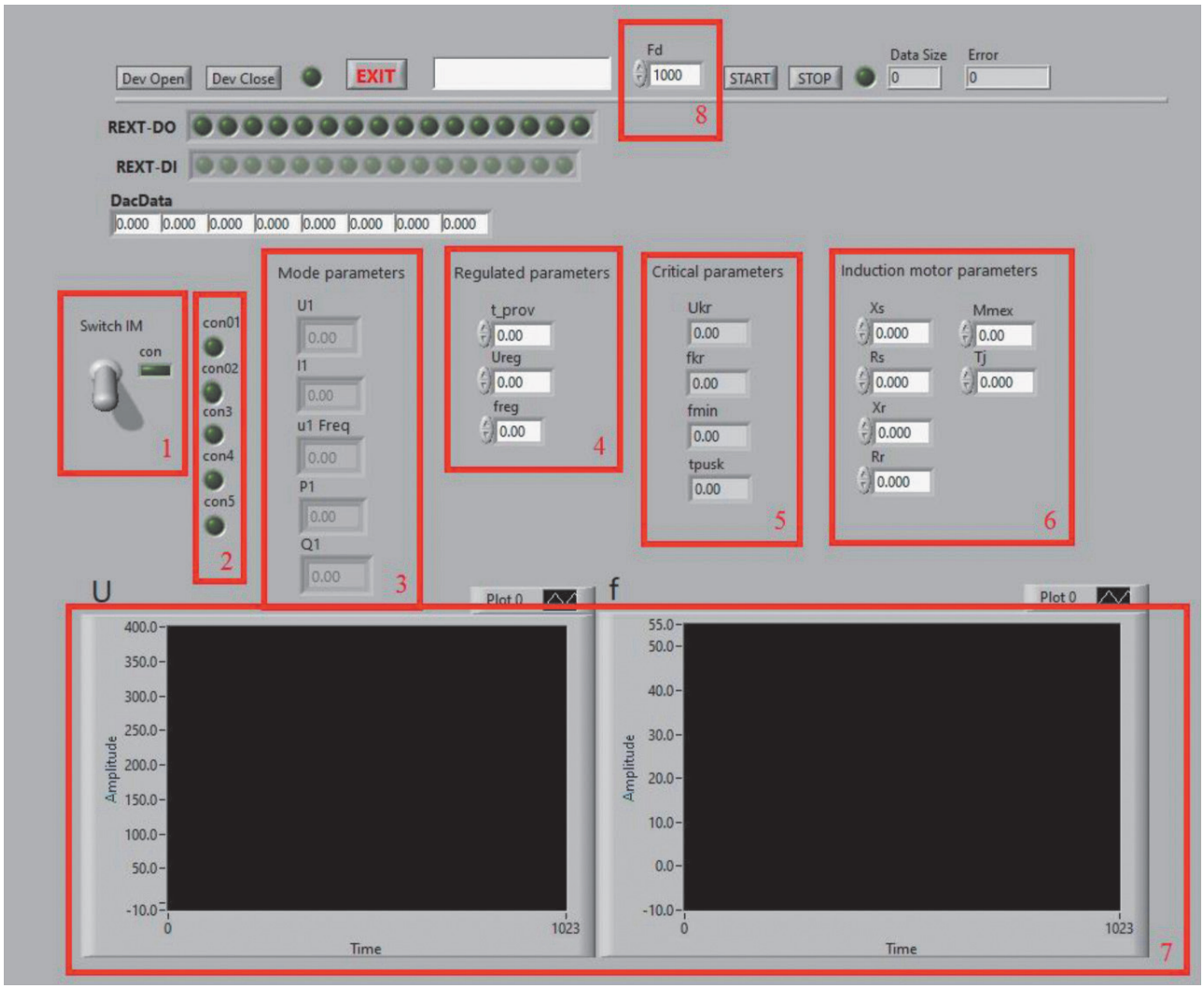


Рис. 3. *Пользовательский интерфейс программного обеспечения*
Fig. 3. *Software user interface*

в котором оценивается нормальность режимных параметров в процессе пуска и определяются значения критических параметров режима (критического напряжения и частоты).

6. Блок реализации 2-й части алгоритм 2-го этапа контроля успешности пуска АД, в котором оценивается допустимость напряжения и частоты для успешного пуска АД.

7. Блок реализации алгоритма 3-го этапа контроля успешности пуска АД, в котором оценивается допустимость снижения частоты в ЛСЭ.

8. Блок реализации алгоритма определения угловой скорости вращения ротора АД.

9. Блок реализации алгоритма 4-го этапа контроля успешности пуска АД, в котором производится прогностическое определение продолжительности пуска двигателя под механической нагрузкой.

10. Блок реализации алгоритма 5-го этапа контроля успешности пуска АД, в котором осуществляется ЗПВ.

Из рис. 4 видно, что для определения актуального состояния двигателя разработанный прототип автоматики ориентируется на положение переключателя на пользовательском интерфейсе. При отключенном переключателе (sostV=0) автоматика не активна, а алгоритмы не инициализированы. Изменение положения переключателя (sostV = 1) приводит к инициализации алгоритма поиска допустимого режима питающей сети для включения АД на заданном интервале при фиксации установившегося режима длительностью до 5 с. Далее, все процедуры алгоритмов ориентируются на внутренний таймер, который запускается при пуске двигателя и обнуляется при его

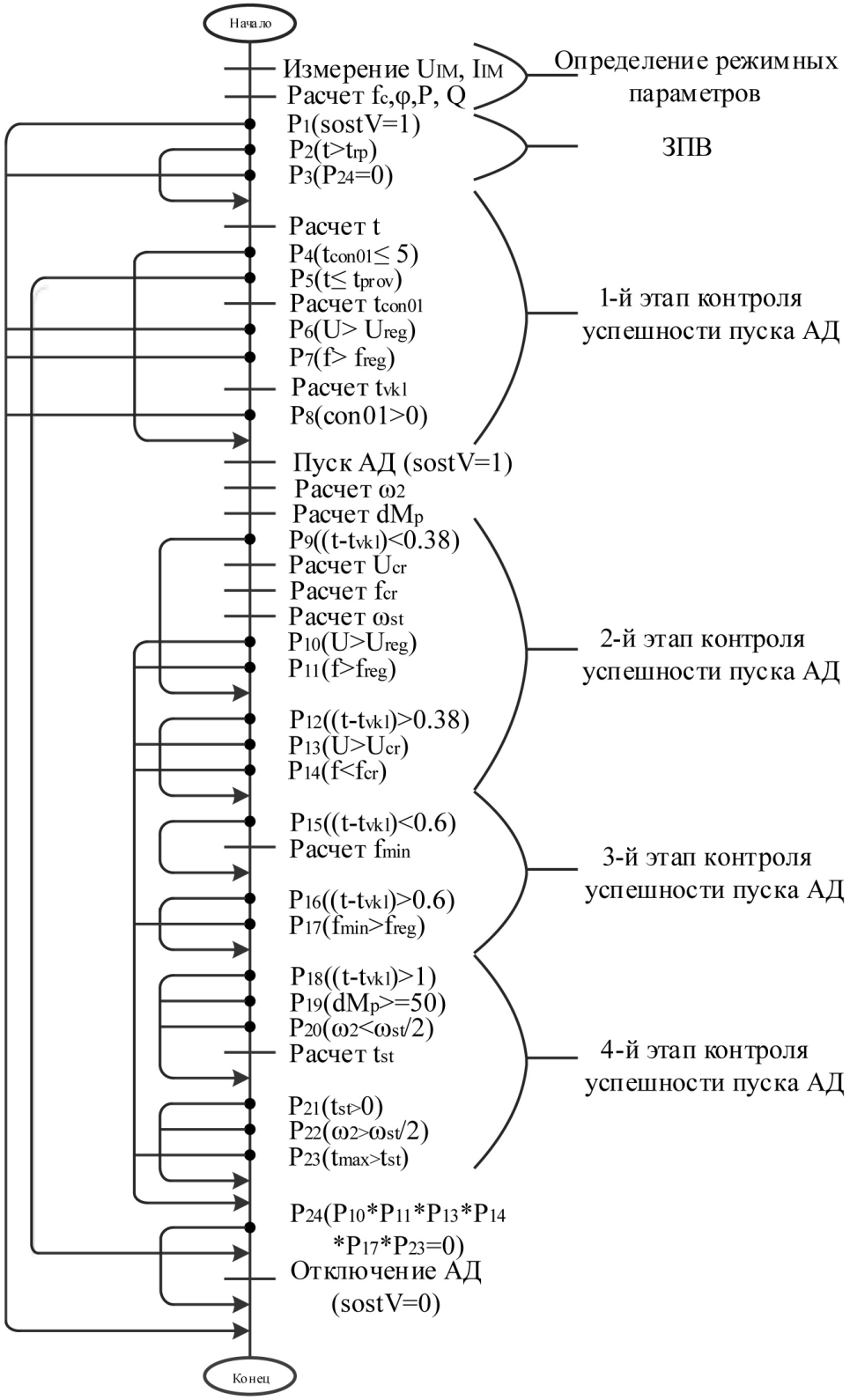


Рис. 4. *Алгоритм контроля успешности пуска асинхронного двигателя в локальной системе энергоснабжения*
Fig. 4. *Algorithm of induction motor start-up success monitoring in a local power supply system*

отключении. Дополнительно для определения времени пуска АД в алгоритме установлен счетчик, фиксирующий количество приращений скорости вращения ротора, при превышении заданного значения которого инициализируется алгоритм прогностического определения продолжительности пуска АД.

Таблица 1. Переменные алгоритма контроля успешности пуска асинхронного двигателя
Table 1. Variables of the induction motor start-up success monitoring algorithm

Характер		Технологическое содержание	Обозначение (Тип)
Входные		Линейное мгновенное напряжение на шинах двигателя	UIM (A)
		Фазный мгновенный ток двигателя	IIM (A)
Внутренние	Определяемые	Угол между фазным током и фазным напряжением	φ (D)
		Частота питающей сети	fc (D)
		Активная мощность двигателя	P (D)
		Реактивная мощность двигателя	Q (D)
		Счетчик относительного времени работы алгоритма	t (D)
		Счетчик времени оценки нормальности режима до пуска двигателя	tcon01 (D)
		Относительное время включения двигателя	tvkl (D)
		Угловая скорость вращения ротора	w2 (D)
		Счетчик положительной разницы ускоряющего и тормозящего моментов	dMp (D)
		Действующее критическое напряжение	Ucr (D)
		Предельно допустимое максимальное значение частоты для успешного пуска	fcr (D)
		Нормальное установившееся значение угловой скорости ротора	wst (D)
		Минимальная частота в ЛСЭ при пуске АД	fmin (D)
		Продолжительность пуска АД	tst (D)
		Состояние проверки по нормальности исходного режима ЛСЭ (необходимые условия) для пуска АД	con01 (D)
	Задаваемые	Состояние переключателя	sostV (L)
		Относительное время до запрета повторного включения двигателя	trp (D)
		Интервал проверки нормальности режимных параметров до пуска АД	tprov (D)
		Предельно допустимое минимальное действующее значение напряжения для ЛСЭ	Ureg (D)
		Предельно допустимое минимальное значение частоты в ЛСЭ	freg (D)
		Допустимая длительность пуска двигателя	tmax (D)

В соответствии с заданными временными задержками и счетчиками внутри алгоритмов формируются команды на отключение/продолжение пуска АД на выделенных этапах. При выявлении условий неуспешности соответствующий блок выдает команду на логический выход промышленного контроллера БУ, отключая двигатель от питающей сети.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Испытания прототипа автоматики контроля успешности пуска асинхронного двигателя на физической модели локальных систем энергоснабжения.

Электродинамическая модель ЛСЭ с АД. Экспериментальная проверка работоспособности прототипа автоматики проведена на базе электродинамической модели (ЭДМ) центра коллективного пользования, называемого «Центр испытаний устройств контроля и управления режимами электроэнергетических систем» Новосибирского государственного технического университета. В состав ЭДМ входят три основные группы оборудования: силовое и коммутационное; измерительные и регистрирующие приборы и аппараты; системы управления силовым и коммутирующим оборудованием.

Для испытания разработанного прототипа автоматики была создана физическая модель ЛСЭ с АД, приведенная на рис. 5. Основные элементы модели приведены в табл. 2.

Модель ЛСЭ представляет собой совокупность специального оборудования, имитирующего работу основных элементов оригинала. Исключением являются первичные двигатели (вместо газопоршневых двигателей/турбин использованы двигатели постоянного тока) и воздушные линии электропередачи (имеют не распределенные, а сосредоточенные параметры). Остальные элементы

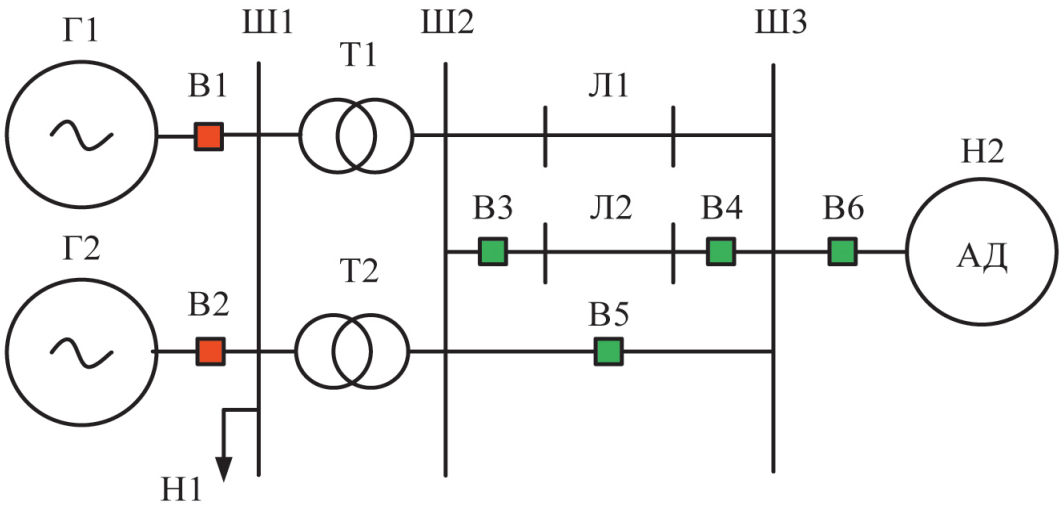


Рис. 5. *Схема локальной системы энергоснабжения с асинхронным двигателем для испытания прототипа автоматики*
Fig. 5. *Diagram of the local power system with an induction motor to test an automation equipment prototype*

ЛСЭ и внешней электрической сети на ЭДМ представлены масштабными физическими моделями. Параметры и конструкция силовых элементов модели подобраны таким образом, чтобы по возможности максимально удовлетворить критериям подобия при моделировании, прежде всего, переходных электромеханических процессов.

Сопряжение прототипа автоматики с объектом управления выполнено в соответствии с рис. 6, где сигнал с ТТ, расположенный на фазе А, поступает на REXT-I3; сигнал с ТН, подключенный к линейному напряжению АВ, поступает на REXT-U8; КБУ – контакты REXT-DO220; К2 – катушка промежуточного реле, контакты которой подают/снимают напряжение на/с катушки магнитного пускателя К1, контакты которого подключают/отключают АД к/от питающей сети. Сами блоки расширения REXT-U8, REXT-I3, REXT-DO220 монтируются на тыльной стороне корпуса RAPTOR-x86.

Таблица 2. Основные элементы модели локальной системы энергоснабжения с асинхронным двигателем
Table 2. Main elements of the local power supply system model with an induction motor

	Элемент схемы	Тип	Кол-во	Примечание
1	Модельный синхронный генератор (СГ)	МК3-1500	2	Uном = 220 В Рном = 3 кВт
2	Группа модельных однофазных силовых трансформаторов	МТО-1.7	2	Кт = 220/380 Sном = 1,7 кВт
3	Осветительная нагрузка	–	1	Uном=220 В Рном = 0,9 кВт
4	АД	АИР90L2	1	Uном = 380 В Рном = 3 кВт Мном = 10 Нм
5	Модель линии электропередачи (ЛЭП)	–	2	Хл = 16 Ом Сфф =1мкФ Сфз = 2,27мкФ Uном=380
6	Модель силового выключателя	–	6	–
7	Шина	–	3	–
8	ТТ	И508М	1	Кт = 100/5
9	ТН	УТН-1	1	Кт = 380/100
	Автоматика беспилотного управления режимами ЛСЭ [9]	ПТК Торнадо	1	Применялся для синхронизации и регулирования работы СГ
	БУ	RAPTOR-x86	1	Прототип автоматики контроля успешности пусков АД

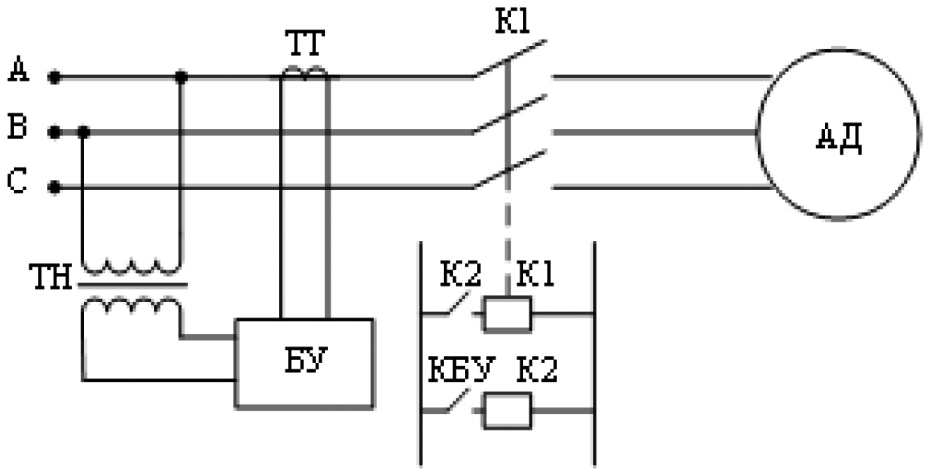


Рис. 6. *Схема сопряжения прототипа автоматики с объектом управления*
Fig. 6. *Interface circuit of the automation equipment prototype and the control object*

Программа и результаты испытаний прототипа автоматики контроля успешности пуска асинхронного двигателя на физической модели локальных систем энергоснабжения. Программа испытаний предусматривала проверку работы прототипа автоматики в условиях изменения напряжения, частоты и сопротивления связи между источником и нагрузкой в ЛСЭ, а также механической загрузки двигателя. Пуск АД в схеме рис. 6 производился только после создания нормального установившегося режима ЛСЭ (Г1 и Г2 работают на выделенную нагрузку Н1) и подключения необходимых для пункта программы элементов, образующих требуемые схемно-режимные условия.

Содержание программы испытаний:

1. Проверка блокировки пуска АД на 1-м этапе при выходе параметров за допустимые значения для нормального режима.

2. Проверка отключения АД на 2-м этапе по условию снижения напряжения в ЛСЭ ниже допустимого уровня.

3. Проверка отключения АД при превышении допустимой механической нагрузки на валу в заданных схемно-режимных условиях.

4. Проверка отключения АД по условию снижения напряжения питания ниже допустимого уровня в процессе пуска при вариации уставки автоматического регулятора возбуждения (АРВ) СГ в исходном режиме (номинальное фазное напряжение 127 В).

5. Проверка отключения АД на 2-м этапе по условию превышения допустимой частоты ПС в процессе пуска при вариации уставки автоматического регулятора скорости (АРС) СГ в исходном режиме.

6. Проверка отключения АД на 3-м этапе по условию снижения частоты в ПС в процессе пуска ниже допустимого значения (минимально допустимое значение частоты в ЛСЭ задавалось 45 Гц) при вариации уставки АРС СГ в исходном режиме.

7. Проверка отключения АД на 2-м этапе по условию снижения напряжения питания ниже допустимого уровня в процессе пуска при вариации сопротивления связи между СГ и АД.

Для проведения испытаний пунктов 1–6 в схеме рис. 4 вводился в работу выключатель В5 для усиления электрической связи между генераторным и нагрузочным узлами. В пункте 7 для изменения схемных условий в ЛСЭ при отключенном выключателе В5 вводились в работу В3 и В4.

Описание программы и результаты испытаний прототипа автоматики контроля успешности пусков АД на физической модели ЛСЭ приведены в табл. 3. В представленных пунктах программы испытаний прототипа были определены критические параметры режима и значения времени пуска и минимальной частоты в ЛСЭ. Погрешность определения минимальной частоты в ЛСЭ не превысила 4%, продолжительности пуска двигателя – 14%.

Таблица 3. Программа и результаты испытаний
Table 3. Test program and test results

№	Смысл	Примечание	Результат
1	Выход параметров за допустимые значения для нормального режима на заданном интервале до включения АД	Интервал – 10 с	На заданном 10-секундном интервале напряжение на шинах АД до пуска было ниже допустимого, команда на пуск была заблокирована
2	Выход параметров за допустимые значения для ЛСЭ после включения АД	Минимально допустимое напряжения для ЛСЭ – 300 В	Пуск прерван по условию (1) за 0,2 с
3	Изменение режимных условий ЛСЭ	Вариация момента сопротивления в диапазоне от 0,076 до 0,24 Мном	Пуск прерван по условию (3) при моменте сопротивления 0,21 Мном за 0,6 с
4		Вариация уставки АРВ СГ в диапазоне от 1,1 до 0,85 Uном при моменте сопротивления 0,18 Мном	Пуск прерван за 1,25 с по условию (3) при напряжении на СГ 0,95 Uном. Фактическое недопустимое снижение напряжения в сети соответствовало напряжению на СГ 0,85 Uном
5		Вариация уставки АРС СГ в диапазоне от 50 до 54 Гц при моменте сопротивления 0,18 Мном	Определяющим условием для прерывания пуска на 2-м этапе из-за слабой электрической связи является (3)
6		Вариация уставки АРС СГ в диапазоне от 50 до 46 Гц при моменте сопротивления 0,18 Мном	Пуск прерван из-за наличия низкочастотных колебаний при частоте 49 Гц по условию (2) за 6 с. При отсутствии колебаний пуск прерван при частоте 48 Гц по условию (6) за 0,6 с.
7	Изменение схемных условий ЛСЭ	Изменение числа ЛЭП между АД и СГ при моменте сопротивления 0,18 Мном	Пуск прерван по условию (3) за 0,479 с и 0,508 с для одной и двух ЛЭП соответственно

Таблица 4. Результаты испытания автоматики по 23 пускам асинхронного двигателя при вариации условий
Table 4. Automation equipment test results for 23 induction motor start-ups under varying conditions

Величина	Значение	Оценка успешности пуска прототипом автоматики	Фактическая успешность пуска	Условие прерывания
Мсопрт, о.е.	0,076	+	+	-
	0,115	+	+	-
	0,136	+	+	-
	0,178	+	+	-
	0,21	-	-	(3)
	0,24	-	-	(3)
Uг, о.е.	1,10	+	+	-
	1,05	+	+	-
	1,00	+	+	-
	0,98	+	+	-
	0,95	-	+	(3)
	0,90	-	+	(3)
	0,85	-	-	(3)
fc, Гц	50,00	+	+	-
	49,50	+	+	-
	49,00	-	-	(2)
	49,00	+	+	-
	48,00	-	-	(6)
	50,00	+	+	-
	51,00	+	+	-
	53,00	+	+	-
	54,00	+	+	-
Количество линий связи, шт.	1	-	-	(3)
	2	-	-	(3)

В качестве примеров на рис. 7 *a, b* приведены осциллограммы процессов при пуске АД в ЛСЭ с критическими параметрами режима для пункта 6 программы испытаний. На рис. 7 *a* представлен процесс успешного пуска АД при частоте предшествующего режима, равной 50 Гц с моментом сопротивления 0,18 Мном (все условия успешности соблюдены).

На рис. 7 *b* представлен процесс прерванного через 0,7 с по условию (6) 3-го этапа контроля пуска АД при частоте предшествующего режима, равной 48 Гц с момен-

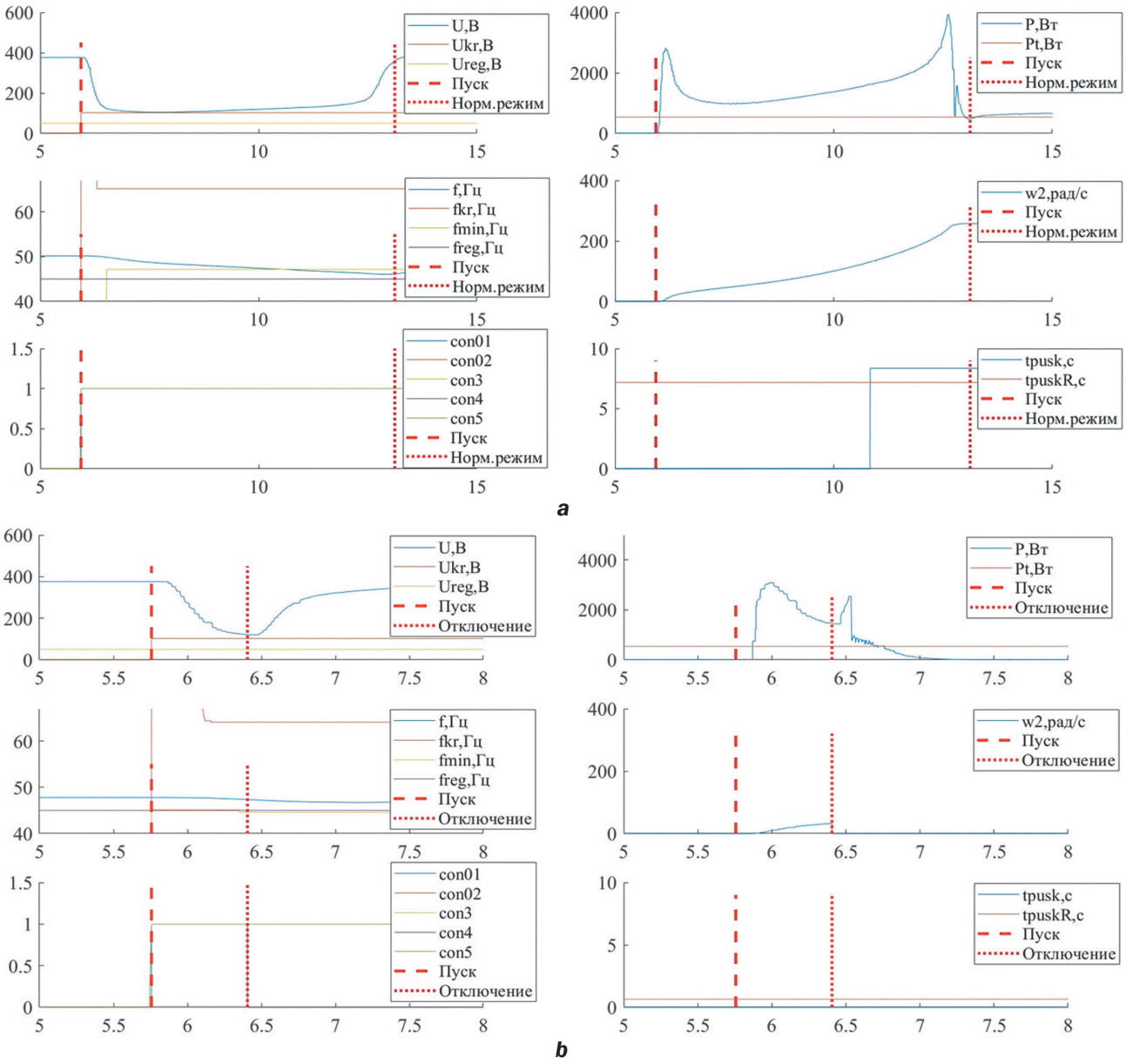


Рис. 7. *Осциллограмма процесса при пуске асинхронного двигателя в локальных системах энергоснабжения с критическими параметрами режима при частоте предшествующего режима 50 Гц (a) и 48 Гц (b): U – напряжение; P – активная мощность; Pt – механическая мощность; f – частота; Ukr – критическое напряжение; fmin – расчетное предельное снижение частоты; tpusk – расчетное время пуска; Ureg– минимально допустимое напряжение; freg – минимально допустимая частота; tpuskR – фактическая продолжительность пуска; w2 – расчетная угловая скорость; con01 – условие 1-го этапа; con02 – условие 2-го этапа (нормальность напряжения и частоты); con3 – условие 2-го этапа (допустимость снижения напряжения и частоты); con4 – условие 3-го этапа; con5 – условие 4-го этапа*

Fig. 7. *Oscillogram of the induction motor start-up in the local power supply systems with mode critical parameters when the frequency of the previous mode is 50 Hz (a) and 48 Hz (b): U – voltage; P – active power; Pt – mechanical power; f – frequency; Ukr – critical voltage; fmin – calculated maximum frequency reduction; tpusk – estimated start-up time; Ureg– minimum permissible voltage; freg – minimum permissible frequency; tpuskR – actual start-up duration; w2 – calculated angular velocity; con01 –1st stage condition; con02 – 2nd stage condition (normality of voltage and frequency); con3 – 2nd stage condition (tolerability of voltage and frequency reduction); con4 – 3rd stage condition; con5 – 4th stage condition*

том сопротивления 0,18 Мном. В интервал отключения входили: предиктивная оценка БУ величины минимальной частоты продолжительностью 0,6 с; время срабатывания модельного выключателя 0,1 с.

В табл. 4 приведены результаты испытаний прототипа автоматики при вариации схемно-режимных условий. В 91% случаев прототип корректно прогностически определял успешность/неуспешность пуска АД в ЛСЭ (случаев отсутствия выдачи команды на прерывание процесса пуска в условиях его неуспешности не зафиксировано).

Результаты проведенных испытаний прототипа автоматики контроля успешности пусков АД на базе RAPTOR-x86 на физической модели ЛСЭ подтвердили его работоспособность. Применение автоматики в ЛСЭ позволит предотвращать повреждение двигателей или оборудования питающих сетей, сохранить их ресурс работоспособности в процессах неуспешных прямых пусков путем их выявления на ранних этапах и прерывания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с вышеизложенным можно сделать следующие выводы:

1) предиктивный контроль успешности пуска АД в ЛСЭ возможен;

2) поэтапный контроль пуска позволяет прерывать процесс на ранних стадиях выявления его неуспешности;

3) высокая достоверность прогностической оценки контроля успешности пуска АД подтверждает возможность ее осуществления на базе предложенной модели по определению критических параметров режима, погрешность которой в испытаниях не превышала 4%, а погрешность оценки продолжительности пуска не превышала 14%.

Значительных запас обеспечения надежности локальных систем энергоснабжения с крупными асинхронными двигателями содержится в возможностях автоматического контроля успешности их пуска с прогностическим прерыванием на ранних стадиях выявления неуспешности.

Полученные при выполнении НИОКР теоретические и экспериментальные результаты разработки прототипа автоматики контроля успешности пуска АД в системах соизмеримой мощности позволяют перейти к созданию опытных образцов с их применением на реальных объектах.

Список источников

1. Маркова В.М., Чурашев В.Н. Децентрализация энергетики: интеграция и инновации // ЭКО. Всероссийский экономический журнал. 2020. Т. 50. № 4. С. 8–27. https://doi.org/10.30680/EC00131-7652-2020-4-8-27. EDN: QCCJKR.
2. Гуревич Ю.Е., Илюшин П.В. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография. Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018. 280 с. EDN: YWRPSP.
3. Илюшин П.В. Перспективные направления развития распределительных сетей при интеграции локальных интеллектуальных энергосистем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 4. С. 70–80. EDN: JVMAIL.
4. Tungadio D.H., Sun Yanxia. Predictive controller for interconnected microgrids // Generation, Transmission & Distribution. 2020. Vol. 14. Iss. 19. P. 4273–4283. https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1257.
5. Litwin M., Zielinski D., Gopakumar K. Remote micro-grid synchronization without measurements at the point of common coupling // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 212753–212764. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3040697.
6. Илюшин П.В., Куликов А.Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией: монография. Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. 364 с. EDN: UBJFNT.
7. Бык Ф.Л., Мышкина Л.С. Эффекты интеграции локальных интеллектуальных энергосистем // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. 24. № 1. P. 3–15. https://doi.org/10.30724/19989903-2022-24-1-3-15. EDN: QZOPWN.
8. Илюшин П.В., Филиппов С.П., Новиков Н.Л. Требования к маневренности газотурбинных и газопоршневых генерирующих установок // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: труды XCI Заседания Междунар. науч. семинара им. Ю.Н. Руденко (г. Ташкент, 23–27 сентября 2019 г.). Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 2019. Т. 1. С. 343–352. EDN: WSAUCX.
9. Gouichiche A., Safa A., Chibani A., Tadjine M. Global fault-tolerant control approach for vector control of an induction motor // Electrical Energy Systems. 2020. Vol. 30. Iss. 8. P. e12440. https://doi.org/10.1002/2050-7038.12440.
10. Воропай Н.И., Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2014. № 1. С. 64–73. EDN: SBKDQB.
11. Ozpineci B., Bose B.K. Soft-switched performance-enhanced high frequency non-resonant link phase-controlled converter for AC motor drive // Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Aachen, 31 August – 4 September 1998). Aachen, 1998. Vol. 2. P. 733–739. https://doi.org/10.1109/IECON.1998.724184.

12. Фишов А.Г., Дулов И.В., Фролов М.Ю. Контроль успешности пусков асинхронных двигателей в локальных энергосистемах // Релейная защита и автоматизация. 2023. № 3. С. 4–17. EDN WVCNSL.
13. Fishov A.G., Dulov I.V., Khatylenko R.M. The induction motor model for control starting in small-scale power systems // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Magnitogorsk, 24–26 September 2021). Magnitogorsk: IEEE, 2021. P. 255–260. https://doi.org/10.1109/UralCon52005.2021.9559568.
14. Fishov A.G., Dulov I.V., Khatylenko R.M., Frolova Y.A. The algorithm for controlling the success of induction motor starting in small-scale power systems // International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (Novosibirsk – Yekaterinburg, 11–13 November 2022). IEEE, 2022. P. 1690–1696. https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017083.
15. Булычев А.В., Грибков М.А. Анализ процессов самозапуска электродвигателей в современных электрических распределительных сетях с позиций релейной защиты // Релейная защита и автоматизация. 2023. № 1. С. 30–38. EDN: QIODPZ.
16. Мугалимов Р.Г., Храмшин Р.Я., Мугалимова А.Р. Сравнительный анализ методик расчета параметров электрических схем замещения асинхронных двигателей // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т. 3. № 1. С. 36–40. EDN: VOXRPT.
17. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод: монография. М.: Академия, 2004. 256 с. EDN: QMIONV.
18. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / под ред. Л.Г. Мамиконянца. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
19. Фишов А.Г., Осинцев А.А., Какоша Ю.В., Одинабеков М.З. Активные распределительные электрические сети с децентрализованным мультиагентным управлением режимом // Электричество. 2022. Ч. 2. № 11. С. 29–45. https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-11-29-45. EDN: HYXXZS.
20. Фишов А.Г., Ивкин Е.С., Гилев О.В., Какоша Ю.В. Режимы и автоматика Минигрид, работающих в составе распределительных электрических сетей ЕЭС // Релейная защита и автоматизация. 2021. № 3. С. 22–37. EDN: YPYCDG.

References

1. Markova V.M., Churashev V.N. Energy decentralization: integration and innovation. *ECO*. 2020;50(4):8-27. (In Russ.). https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2020-4-8-27. EDN: QCCJKR.
2. Gurevich Yu.E., Ilyushin P.V. *Features of mode calculations in energy regions with distributed generation.* Nizhnij Novgorod: The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration; 2018, 280 p. (In Russ.). EDN: YWRPSP.
3. Ilyushin P.V. Advanced trends of distribution network development when integrating local intelligent power systems. *Electric Power. Transmission and distribution.* 2021;4:70-80. (In Russ.). EDN: JVMAIL.
4. Tungadio D.H., Sun Yanxia. Predictive controller for interconnected microgrids. *Generation, Transmission & Distribution*. 2020;14(19):4273-4283. https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1257.
5. Litwin M., Zielinski D., Gopakumar K. Remote micro-grid synchronization without measurements at the point of common coupling. *IEEE Access*. 2020;8:212753-212764. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3040697.
6. Ilyushin P.V., Kulikov A.L. *Automatic control of normal and emergency modes in energy districts with distributed generation.* Nizhnij Novgorod: The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration; 2019, 364 p. (In Russ.). EDN: UBJFNT.
7. Byk F.L., Myshkina L.S. Effects of local intelligent energy systems integration. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(1):3-15. (In Russ.). https://doi.org/10.30724/19989903-2022-24-1-3-15. EDN: QZOPWN.
8. Ilyushin P.V., Filippov S.P., Novikov N.L. Maneuverability requirements for gas turbine and gas piston generating installations. In: *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki: XCI Zasedanie Mezhdunarodnogo nauchnogo seminara im. Yu.N. Rudenko = Methodological issues in studying large energy system reliability: proceedings of the 91st Meeting of the International scientific seminar named after Yu.N. Rudenko*. 23–27 September 2019, Tashkent. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute SB RAS; 2019, vol. 1, p. 343-352. (In Russ.). EDN: WSAUCX.
9. Gouichiche A., Safa A., Chibani A., Tadjine M. Global fault-tolerant control approach for vector control of an induction motor. *Electrical Energy Systems*. 2020;30(8):e12440. https://doi.org/10.1002/2050-7038.12440.
10. Voropaj N.I., Stennikov V.A. Integrated smart energy systems. *Thermal Engineering*. 2014;1:64-73. (In Russ.). EDN: SBKDQB.
11. Ozpineci B., Bose B.K. Soft-switched performance-enhanced high frequency non-resonant link phase-controlled converter for AC motor drive. In: *Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 31 August – 4 September 1998, Aachen. Aachen; 1998, vol. 2, p. 733-739. https://doi.org/10.1109/IECON.1998.724184.
12. Fishov A.G., Dulov I.V., Frolov M.Yu. Controlling the success of induction motor starting in local power systems. *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya*. 2023;3:4-17. (In Russ.). EDN WVCNSL.
13. Fishov A.G., Dulov I.V., Khatylenko R.M. The induction motor model for control starting in small-scale power systems. In: *International Ural Conference on Electrical Power Engineering*. 24–26 September 2021, Magnitogorsk. Magnitogorsk: IEEE; 2021, p. 255-260. https://doi.org/10.1109/UralCon52005.2021.9559568.

14. Fishov A.G., Dulov I.V., Khatylenko R.M., Frolova Y.A. The algorithm for controlling the success of induction motor starting in small-scale power systems. In: *International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences*. 11–13 November 2022, Novosibirsk – Yekaterinburg. IEEE, 2022. P. 1690–1696. https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017083.
15. Bulychev A.V., Gribkov M.A. Analysis of self-starting processes of electric motors in modern electrical distribution networks from the perspective of relay protection. *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya*. 2023;1:30-38. (In Russ.). EDN: QIODPZ.
16. Mugalimov R.G., Hramshin R.Ya., Mugalimova A.R. Comparative analysis of methods for calculating the parameters of the electrical equivalent circuit of asynchronous motors. *Elektrotekhnika: setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal*. 2016;3(1):36-40. (In Russ.). EDN: VOXRPT.
17. Braslavskij I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. *Energy-saving induction motor drive*. Moscow: Akademiya; 2004, 256 p. (In Russ.). EDN: QMIONV.
18. Syromyatnikov I.A. *Operating modes of induction and synchronous motors*. Moscow: Energoatomizdat; 1984, 240 p. (In Russ.).
19. Fishov A.G., Osintsev A.A., Kakosha Yu.V., Odinabekov M.Z. Active power distribution networks with decentralized multi-agent control mode. Part 2. *Elektrichestvo*. 2022;2(11):29-45. (In Russ.). https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-11-29-45. EDN: HYXXZS.
20. Fishov A.G., Pivkin E.S., Gileva O.V., Kakosha Yu.V. Modes and automation of minigrid operating as part of the UPS distribution electric networks. *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya*. 2021;3:22-37. (In Russ.). EDN: YPYCDG.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дулов Илья Вадимович,
ассистент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем,
Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия
✉ dulov.96@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-3736-2411

Фишов Александр Георгиевич,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры автоматизированных электроэнергетических систем,
Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия
agfishov@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-3977-0702

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilya V. Dulov,
Assistant Professor of the Automated Electric Power Systems Department,
Novosibirsk State Technical University,
20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia
✉ dulov.96@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-3736-2411

Alexander G. Fishov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Automated Electric Power Systems Department,
Novosibirsk State Technical University,
20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia
agfishov@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-3977-0702

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the article.

Конфликт интересов

Фишов Александр Георгиевич является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2019 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

Alexander G. Fishov has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2019, but he was not involved in making a decision about accepting the present article for publication. The article was peer reviewed in accordance with the Journal's review procedure. The authors did not report any other conflicts of interest.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 28.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 02.04.2024 г.; принята к публикации 06.05.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 28.02.2024; approved after reviewing 02.04.2024; accepted for publication 06.05.2024.

iPolytech Journal 2024. Т. 28. № 2. С. 320-329 ISSN 2782-4004 (print)
2024;28(2):320-329 ISSN 2782-6341 (online)

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья
УДК 621.311:621.331
EDN: ARJOVW
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-320-329

Моделирование режимов систем тягового электроснабжения с нелинейными стационарными нагрузками

А.В. Крюков[1]✉, А.В. Черепанов[2], Куок Хиеу Нгуен[3]

[1,3]*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*
[1,2]*Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия*

Резюме. Цель исследований – разработка цифровых моделей систем тягового электроснабжения с нелинейной стационарной нагрузкой для определения несимметричных и несинусоидальных режимов. При их формировании применялись методы, основанные на использовании фазных координат и реализованные в программном комплексе Fazonord (версия 5.3.4.1–2024). В состав моделей входили следующие элементы: линии электропередачи 220 кВ, трансформаторы мощностью 40 МВ·А, тяговые сети 25 кВ двухпутных участков, преобразовательный агрегат, питающий систему электроснабжения промышленного транспорта. На основе разработанных моделей определены несимметричные и несинусоидальные режимы при движении поездов по рассматриваемому участку магистральной железной дороги. Показано, что за счет нелинейной стационарной нагрузки, создаваемой шестипульсным преобразователем, коэффициенты гармоник на вводах 10 и 220 кВ тяговой подстанции, питающей выпрямитель, увеличиваются и на шинах 10 кВ превышают 25%. Это следует учитывать при выборе средств снижения гармонических искажений. Показано, что для уменьшения уровней гармоник можно использовать следующие средства: пассивные фильтры, активные кондиционеры, электроподвижной состав нового поколения с четырехквадрантными преобразователями. Установлено, что максимумы коэффициентов несимметрии на шинах 10 кВ тяговых подстанций лежат в диапазоне 4,8...9%. Ввод этих показателей в допустимую область возможно осуществить путем применения пофазно управляемых источников реактивной мощности или симметрирующих трансформаторов. Таким образом, представленные модели дают возможность адекватно определять все параметры режима системы электроснабжения железной дороги переменного тока при наличии стационарных нагрузок с нелинейными вольтамперными характеристиками. Разработанная методика является универсальной и может использоваться для расчета режимов питающих и тяговых сетей различной структуры и конструктивного исполнения.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, тяговые сети 25 кВ, нелинейные стационарные нагрузки, моделирование режимов

Благодарность. Исследования выполнены по программе государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока».

Для цитирования: Крюков А.В., Черепанов А.В., Нгуен Куок Хиеу. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения с нелинейными стационарными нагрузками // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 320–329. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-320-329. EDN: ARJOVW.

POWER ENGINEERING

Original article

Modelling of traction power supply systems with nonlinear stationary loads

Andrey V. Kryukov[1]✉, Aleksandr V. Cherepanov[2], Quoc Hieu Nguyen[3]

[1,3]*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*
[1,2]*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia*

Abstract. The aim was to develop digital models of traction power supply systems with nonlinear stationary loads in order to determine asymmetric and non-sinusoidal modes. To this end, methods based on phase coordinates were implemented in the Fazonord software package (version 5.3.4.1–2024). The models included the following elements: 220 kV transmission lines, 40 MV·A transformers, 25 kV traction networks of double-track sections and a converter

© Крюков А.В., Черепанов А.В., Нгуен Куок Хиеу, 2024

unit powering the industrial transport power supply system. The developed models identified asymmetrical and non-sinusoidal modes during the movement of a train on a specific section of the main railway. It was demonstrated that the nonlinear stationary load generated by a six-pulse converter results in an increase in harmonic coefficients at the 10 and 220 kV inputs of the traction substation feeding the rectifier, exceeding 25% on the 10 kV busbars. This phenomenon should be considered when selecting means to reduce harmonic distortion. These include passive filters, active conditioners and new-generation electric rolling stock with four-quadrant converters. The maximum asymmetry coefficients on the 10 kV busbars of traction substations ranged from 4.8...9%. These values can be reduced down to acceptable limits using phase-controlled reactive power sources or balancing transformers. The presented models allow all the parameters of the AC railway power supply system to be adequately determined under stationary loads with nonlinear voltage-current characteristics. The developed method is versatile and can be used for calculating modes of supply and traction networks of various structures and designs.

Keywords: electric power systems, 25 kV traction networks, nonlinear stationary loads, modeling of modes

Acknowledgement. The research was carried out under the program of the state assignment "Processing applied scientific researches" on the topic "Development of methods, algorithms and software for traction power supply system modes modeling for DC railways".

For citation: Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Nguyen Quoc Hieu. Modelling of traction power supply systems with nonlinear stationary loads. *iPolytech Journal.* 2024;28(2):320-329. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-320-329. EDN: ARJOVW.

ВВЕДЕНИЕ

От тяговых подстанций (ТП) магистральных железных дорог получают питание стационарные потребители, которые можно разделить на две группы: нетяговые и нетранспортные. К первой из них относятся объекты инфраструктуры железнодорожного транспорта, обеспечивающие функционирование перевозочного процесса. Ко второй – населенные пункты и промышленные предприятия различных отраслей, присоединенные к районным обмоткам 6-10-35 кВ ТП. Эти потребители могут иметь достаточно большую мощность, достигающую нескольких десятков МВт и оказывать заметное влияние на режимы систем тягового электроснабжения (СТЭ). Поэтому задача совместного моделирования СТЭ и сетевых районов, питающих стационарные потребители, является актуальной.

Задачам моделирования СТЭ посвящено большое число публикаций. Так, например, технология определения режимов СТЭ, позволяющая оценивать их электромагнитную совместимость со смежными системами, предложена в [1]. Вопросы учета средств компенсации реактивных нагрузок при расчете режимов тяговых сетей (ТС) рассмотрены в [2]. Задача определения транзита мощности из энергосистемы в СТЭ решена в [3]. Методика, позволяющая оценивать влияние накопителей энергии при расчетах СТЭ, предложена в [4]. Особенности режимов СТЭ при движении поездов повышенной массы описаны в [5]. Исследованию параллельной работы внешних и тяговых сетей с учетом несимметрии посвящена статья [6]. Алгоритмы имитационного моделирования СТЭ, базирующиеся на применении вероятностного подхода, предложены в [7]. Анализ программных продуктов, обеспечивающих определение аварийных режимов СТЭ, выполнен в [8]. Методика расчета пропускной способности ТС на основе моделирования предложена в [9]. Вопросы определения режимов ТС переменного тока рассмотрены в [10]. Математические модели динамики электрических процессов в СТЭ описаны в [11]. Совершенствованию средств определения режимов СТЭ посвящены статьи [12, 13]. Задача идентификации СТЭ на базе амплитудно-частотных спектров тока решена в [14]. Оценка эффективности работы защиты, полученная на основе моделирования, дана в [15]. Изучению влияния ремонтных режимов СТЭ на ее пропускную способность посвящена работа [16]. Воздействие тяговых нагрузок на качество электроэнергии в питающих сетях описано в [17, 18]. Обобщенная математическая модель СТЭ переменного тока предложена в [19]. Вопрос применения трехфазного модульного многоуровневого преобразователя в СТЭ рассмотрен в [20]. Результаты анализа показателей СТЭ высокоскоростной железной дороги приведены в [21].

Анализ описанных выше публикаций дает возможность сформулировать вывод о том, что задача совместного моделирования СТЭ и систем электроснабжения (СЭС) стационарных потребителей, питающихся от ТП, решена не в полном объеме. Особенно это касается объектов, включающих устройства силовой электроники, таких, например, как выпрямители, широко применяемые в установках электролиза и на промышленном

электротранспорте. Для решения этой задачи могут эффективно использоваться методы и алгоритмы, предложенные в [22–24] и реализованные в программном продукте Fazonord. Ниже приведены результаты моделирования режимов СТЭ, от одной из подстанций которой получает питание выпрямительный агрегат промышленного электротранспорта.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве объекта исследования была принята СЭС участка магистральной железной дороги, рис. 1 *a*. В ее состав входили следующие элементы: питающие воздушные ЛЭП 220 кВ с проводами АС-240; подстанции с трансформаторами ТДТНЖ-40000/220/27,5/11; тяговые сети 25 кВ двухпутных участков. К районной обмотке 10 кВ ТП 2 был подключен шестипульсный выпрямительный агрегат с трансформатором ТДП-12500. Он входил в состав СЭС промышленного электротранспорта, в ТС которого использовалось напряжение постоянного тока 1,65 кВ. Для моделирования применялся программный комплекс Fazonord [22, 23], версия 5.3.4.1–2024. Рассматривался вынужденный режим работы СЭС при отключенной связи с питающей энергосистемой со стороны ТП 3.

Было проведено моделирование серий режимов СЭС при движении поездов согласно графику, показанному на рис. 2 *a*. Часть визуального отображения расчетной модели, отвечающая нелинейной нагрузке в виде выпрямительного агрегата, приведена на рис. 1 *b*. На рис. 2 *b* в представлены зависимости:

$$I = I(s), I_a = I_a(s),$$

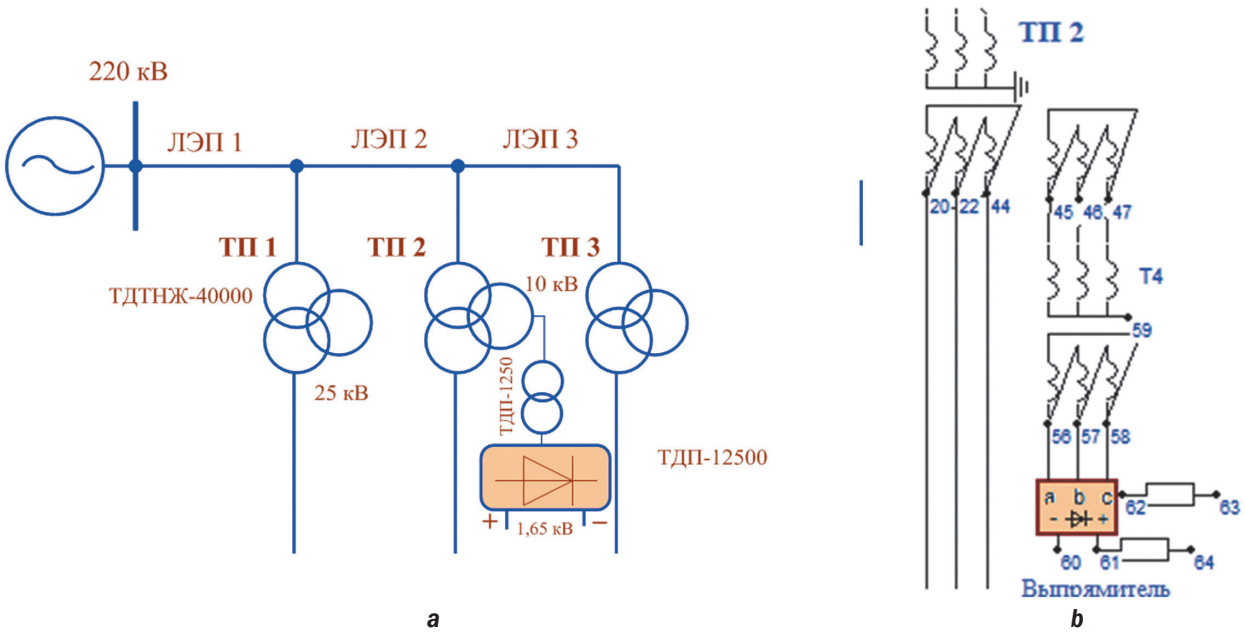
где I, I_a – соответственно, полные и активные токи, потребляемые электровозами; s – набор пикетов, т.е. точек разметки расстояний на железнодорожных линиях. Результаты моделирования проиллюстрированы на рис. 3–7. На рис. 3 показаны следующие графики:

$$U = U(s);\ \ I = I(s);\ P = P(s);\ Q = Q(s),$$

где U, I – напряжения и токи электровозов № 1 (четного направления) и № 7 (нечетного направления); P, Q – активные и реактивные мощности, потребляемые указанными электровозами.

Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

– уровни напряжений на пантографах электровозов № 1 и 7, а также других, представленных на принятом графике движения (рис. 2 *a*) находятся в допустимом диапазоне, определяемом следующим неравенством $21 \le U \le 29$ кВ;



a *b*

Рис. 1. *Схема системы электроснабжения (a) и часть визуального отображения расчетной модели (b), отвечающая нелинейной нагрузке*

Fig. 1. *Circuit diagram of the power supply system (a) and a part of the visual display of the calculation model (b corresponding to a nonlinear load*

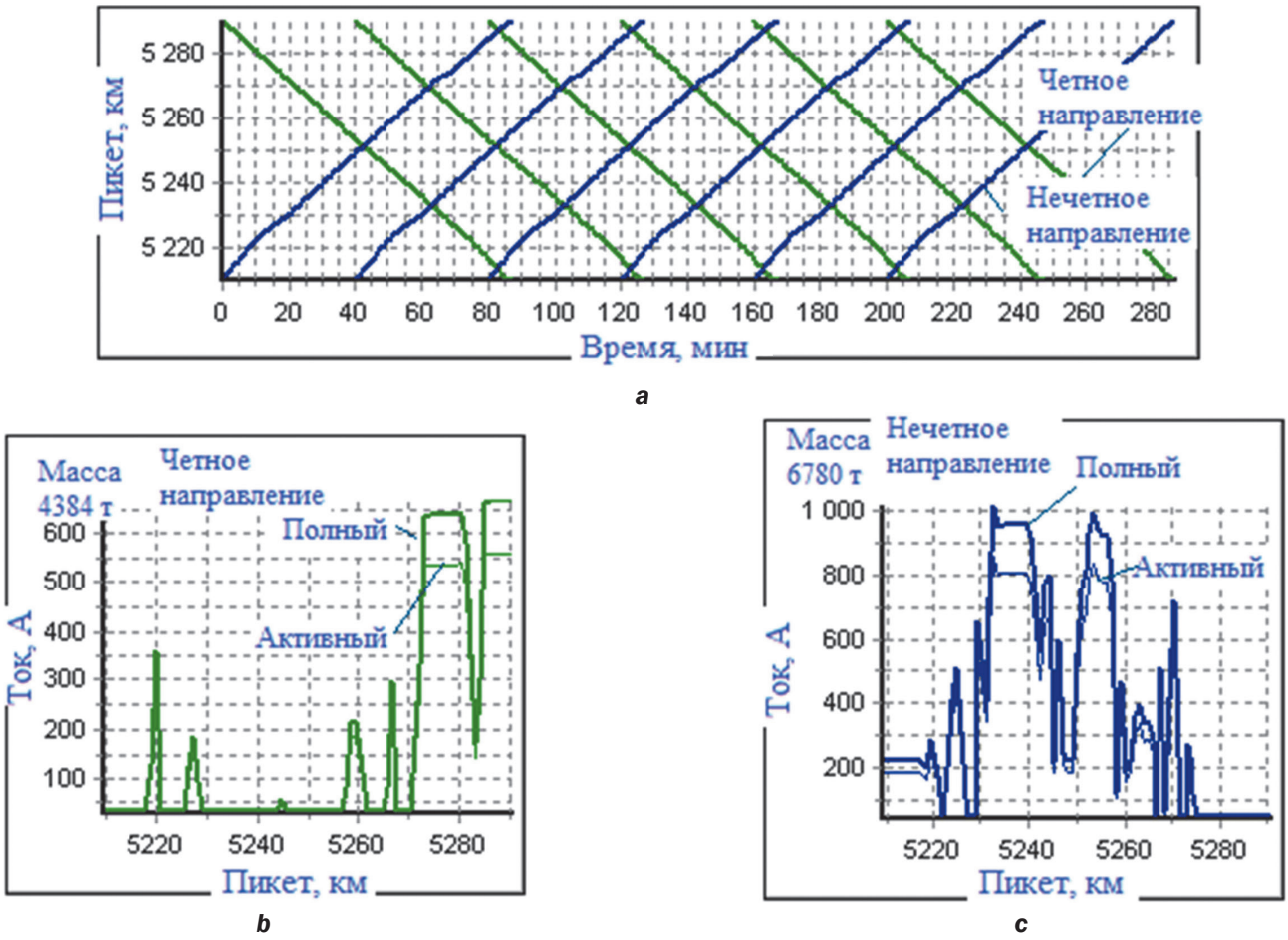


Рис. 2. *График перемещения поездов в пространстве (a) и зависимости токов электровозов от их расположения (b, c)*
Fig. 2. *Graph of train movement in space (a) and dependence of currents of electric locomotives on their location (b, c)*

– отношение средних токов электровозов 7 и 1 выражено

$$I_{7/1} = I_7^{(aver)} / I_1^{(aver)} = 2{,}2;$$

– аналогичные отношения для средних значений активной и реактивной мощностей, соответственно, равны

$$P_{7/1} = P_7^{(aver)} / P_1^{(aver)} \approx Q_7^{(aver)} / Q_1^{(aver)} = 2{,}1\,.$$

На рис. 4 представлены результаты определения сложнонесимметричных режимов рассматриваемой СЭС в виде графиков зависимостей:

$$k_{2U} = k_{2U}(t),$$

где k_{2U} – коэффициенты несимметрии по обратной последовательности, которые вычислялись на вводах 220 и 10 кВ каждой ТП.

На рис. 5 показаны графики максимумов k_{2U} и времена превышения нормально (Т1) и предельно (Т2) допустимых значений. Из анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что уровни несимметрии превышают нормально допустимые пределы на вводах 220 кВ ТП 3, наиболее удаленной от источника. На шинах 10 кВ ТП средние величины k_{2U} лежат в диапазоне 2...3,1%, однако максимальные уровни значительно превышают установленные нормы. Для ввода показателей качества электроэнергии в допустимые пределы можно использовать симметрирующие трансформаторы [25] и пофазно управляемые источники реактивной мощности [26].

На рис. 6 представлены результаты определения несинусоидальных режимов рассматриваемой СЭС в виде графиков зависимостей:

$$k_U = k_U(t),$$

где k_{2U} – коэффициенты несимметрии по обратной последовательности на вводах 220 и 10 кВ ТП 2, к которой был подключен выпрямительный агрегат.

Анализ полученных результатов расчета несинусоидальных режимов позволяет сделать следующие выводы:

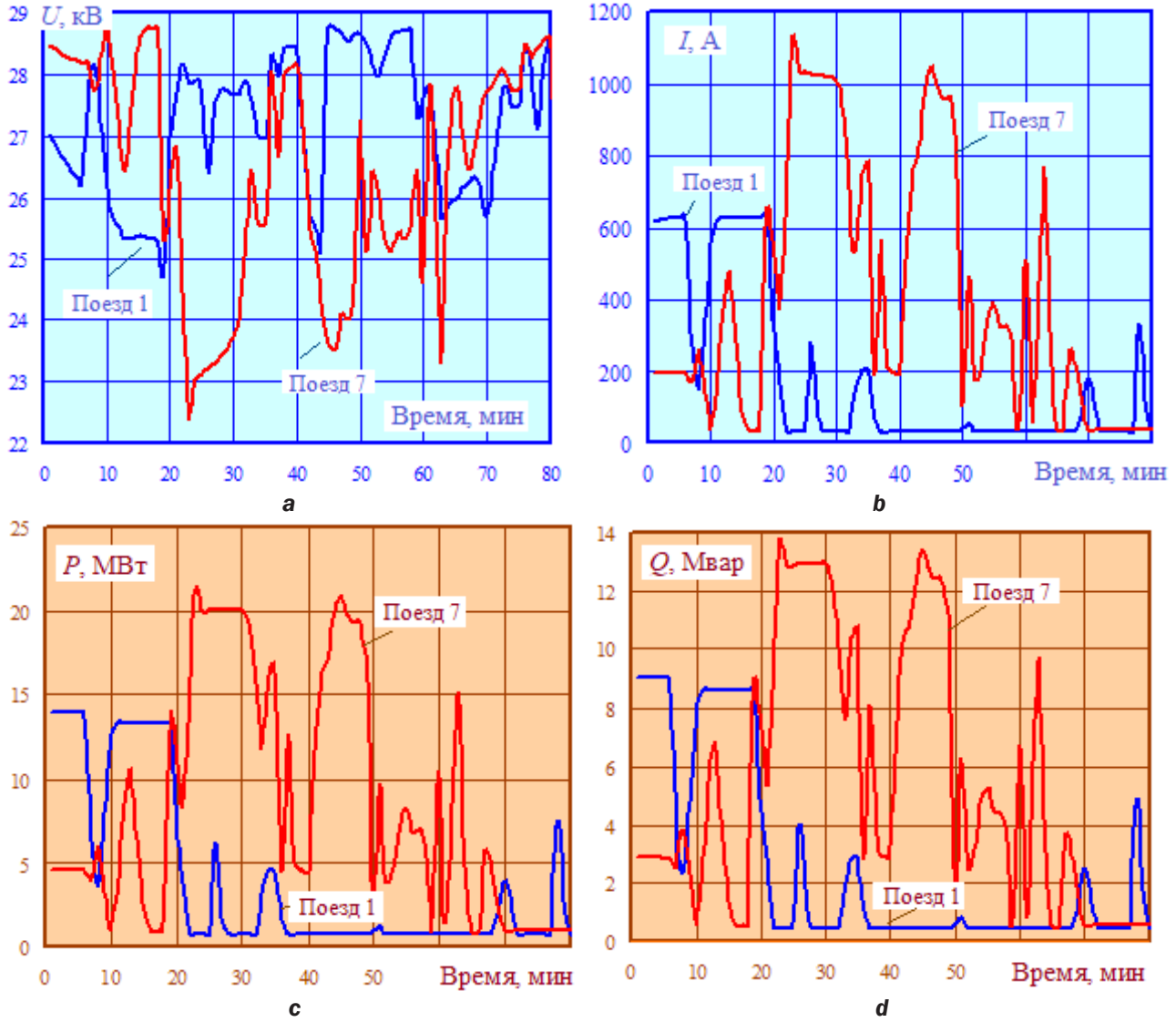


Рис. 3. *Напряжения на пантографах (a), токи (b), активные (c) и реактивные (d) мощности электровозов*
Fig. 3. *Pantograph voltages (a), currents (b), active (c) and reactive (d) powers of electric locomotives*

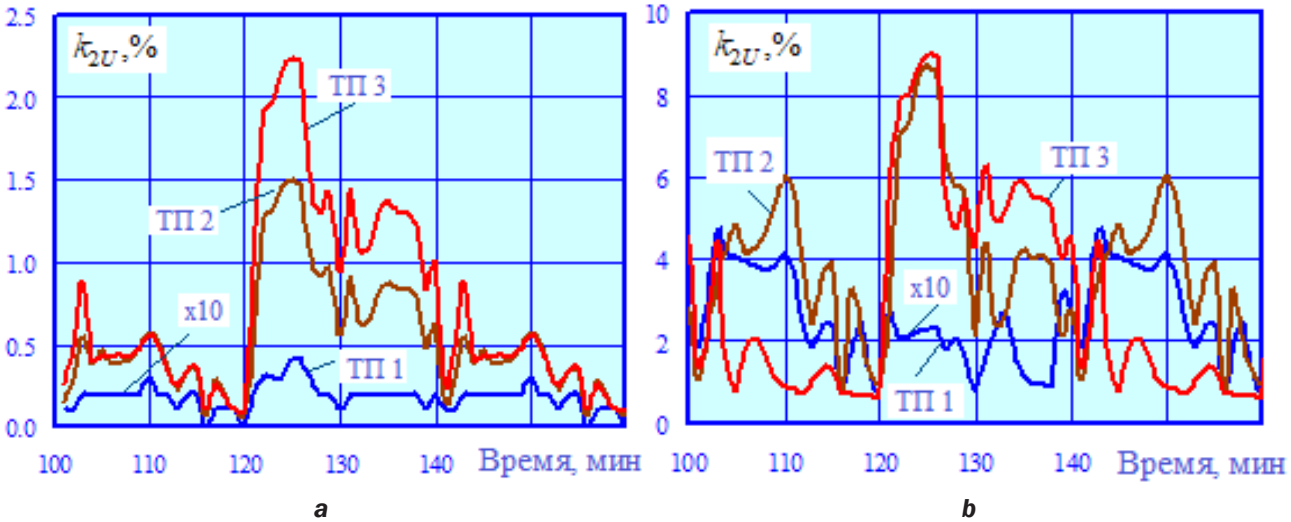
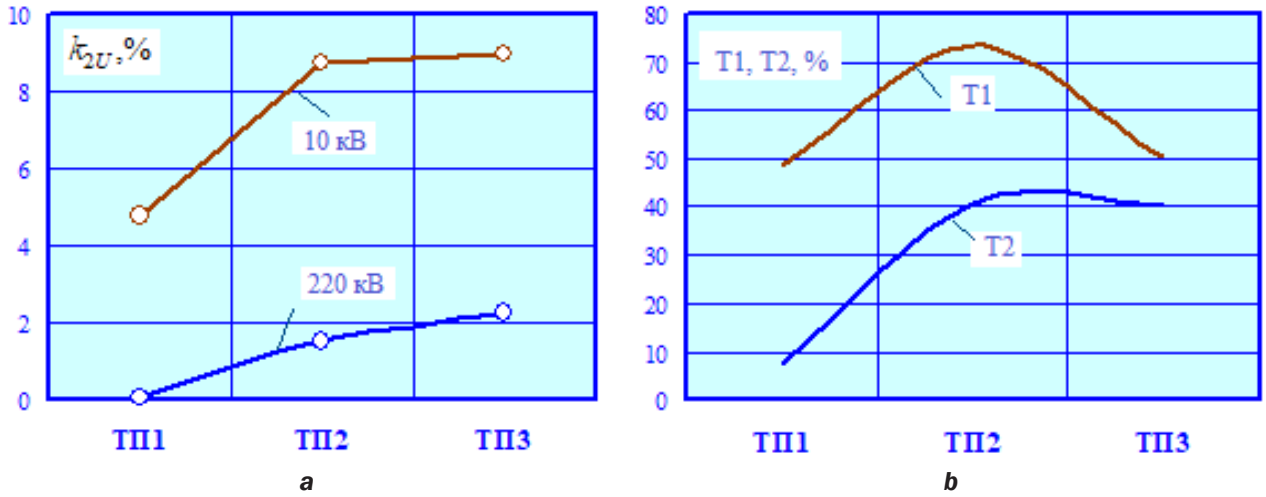
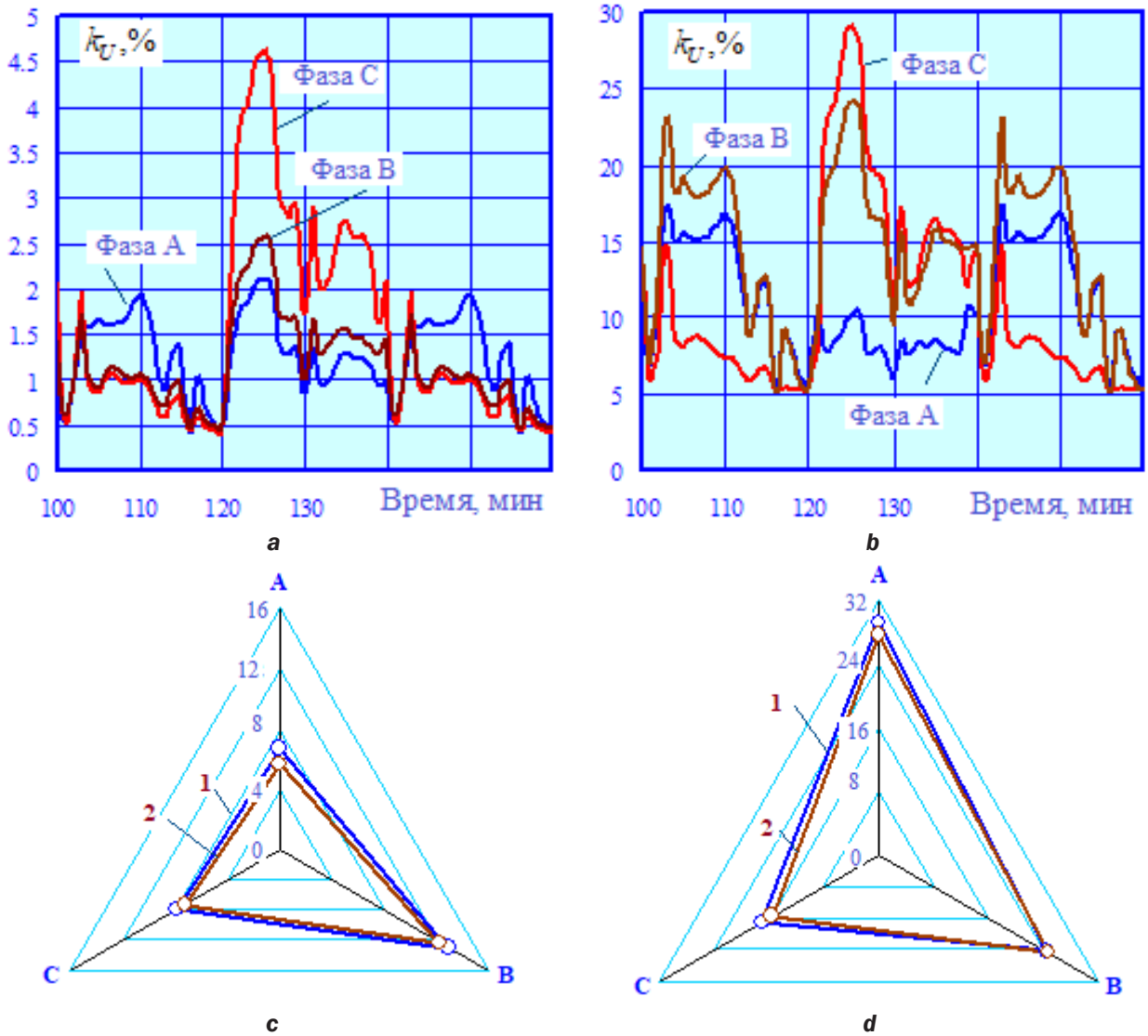


Рис. 4. *Коэффициенты несимметрии на вводах 220 (a) и 10 (b) кВ тяговых подстанций (ТП)*
Fig. 4. *Unbalance ratio at the inputs of 220 kV (a) and 10 kV (b) traction substations*



a *b*

Рис. 5. *Максимумы k_{2U} (a) и времена превышения нормально (T1) и предельно (T2) допустимых значений (b)*
Fig. 5. *Maximums k_{2U} (a) and times of exceeding normal (T1) and maximum (T2) permissible values (b)*



a *b*

c *d*

Рис. 6. *Динамика коэффициентов гармоник k_U (a, b) и максимумы k_U (c, d): а, в – на вводах 220 кВ ТП 2; c, d – на вводах 10 кВ ТП 2; 1 – нагрузка выпрямителя 10 МВт; 2 – нагрузка выпрямителя равна нулю*
Fig. 6. *Dynamics of harmonic coefficients k_U (a, b) and maximums k_U (c, d): a, в – at the inputs of 220 kV traction substation 2 (ТП 2); c, d – at the inputs of 10 kV traction substation 2 (ТП 2); 1 – rectifier load is 10 MW; 2 – rectifier load is zero*

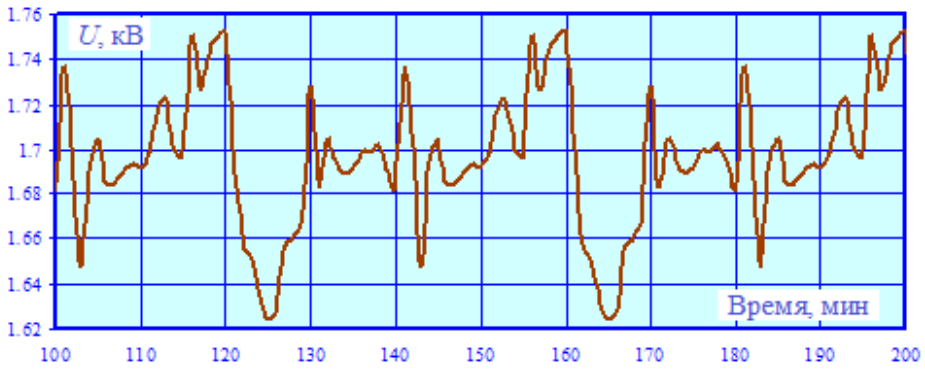


Рис. 7. *Напряжение на выводах выпрямительного агрегата*
Fig. 7. *Voltage at the rectifier unit terminals*

– уровни гармонических искажений значительно превосходят допустимые пределы;

– за счет нелинейной стационарной нагрузки, создаваемой шестипульсным преобразователем, коэффициенты высших гармоник (ВГ) на шинах 10 и 220 кВ тяговой подстанции, питающей выпрямитель, увеличиваются (рис. 6 *c, d*), что следует учитывать при выборе средств уменьшения гармонических искажений;

– для снижения несинусоидальности можно использовать следующие средства: пассивные фильтры ВГ, активные кондиционеры гармоник [26], электроподвижной состав нового поколения с четырехквадрантными преобразователями 4QS (от англ. Four-Quadrant Converters) [27]. На рис. 7 представлены результаты моделирования на стороне постоянного тока в виде графика:

$$U = U(t),$$

где U – напряжение на выходе выпрямительного агрегата, В.

Из рис. 7 следует, что на выводах постоянного тока преобразователя наблюдается достаточно высокая стабильность напряжения. Максимальный размах колебаний равен 150 В, а среднеквадратическое отклонение составляет 36 В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика и цифровые модели для определения режимов СТЭ с нелинейными стационарными нагрузками в виде выпрямительных агрегатов, подключенных к районной обмотке тягового трансформатора. Представленные модели дают возможность адекватно определять все параметры режимов системы электроснабжения при наличии стационарных нагрузок с нелинейными вольтамперными характеристиками. Разработанная методика является универсальной и может использоваться для расчета режимов питающих и тяговых сетей различной структуры и конструктивного исполнения.

Список источников

1. Бочарников Ю.В. Моделирование системы тягового электроснабжения для оценки электромагнитной совместимости со смежными системами // Технологии электромагнитной совместимости. 2008. № 1. С. 45–55. EDN: TEECDR.
2. Баранов И.А., Агунов А.В. Моделирование процессов компенсации реактивной мощности в системе тягового электроснабжения с помощью Matlab-Simulink // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2021. № 2. С. 5–12. EDN: IRFFJT.
3. Константинова Ю.А., Ли В.Н., Константинов А.М. Имитационное моделирование транзита электроэнергии из системы внешнего электроснабжения по тяговой сети переменного тока // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2019. № 4. С. 70–76. EDN: AHXFBO.
4. Гаранин М.А., Блинкова С.А. Моделирование системы тягового электроснабжения с использованием накопителей энергии // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2. С. 85–90. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2023_2_85. EDN: TUOYML.
5. Гаранин М.А., Бошкарева Т.В., Фроленков С.А. Моделирование системы тягового электроснабжения переменного тока для пропуска поездов повышенной массы // Вестник транспорта Поволжья. 2016. № 5. С. 22–27. EDN: XDCFQF.
6. Zemskiy D.R., Sychenko V.G., Bosyi D.O. Simulation of the parallel operation of external and railway ac traction power supply system taking into account unbalanced conditions // Technical Electrodynamics. 2020. No. 2. С. 74–85. https://doi.org/10.15407/techned2020.02.074. EDN: SHVTVO.
7. Комяков А.А., Комякова Т.В., Шкулов А.И. Применение вероятностного подхода для формирования графика электротяговой нагрузки при имитационном моделировании системы тягового электроснабжения // Вестник Ростов-

ского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4. С. 184–192. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2023_4_184. EDN: JLRHET.
8. Костин А.П., Пинчуков П.С. Анализ программного обеспечения для моделирования аварийных режимов в системе тягового электроснабжения // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: труды Всерос. науч.-практ. конф. творческой молодежи с междунар. участием (г. Хабаровск, 18–21 апреля 2023 г.). Хабаровск: ДВГУПС, 2023. Т. 2. С. 23–28.
9. Косарев А.Б., Рудашевский Р.А., Рудашевская А.В., Смолин П.И., Ребров И.А. Определение пропускной способности и моделирование режимов работы систем тягового электроснабжения // Наука и образование транспорту. 2021. № 2. С. 21–26. EDN: QVSYUW.
10. Загорский В.А., Пакулин А.Г., Путько В.Ф. Моделирование системы тягового электроснабжения переменного тока // Вестник транспорта Поволжья. 2012. № 3. С. 11–15. EDN: PJZELP.
11. Быкадоров А.Л., Жуков А.В. Математическое моделирование динамики электрических процессов в системе тягового электроснабжения // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2010. № 3. С. 141–145. EDN: MVCDBZ.
12. Рудашевский Р.А., Рудашевская А.В., Смолин П.И., Ребров И.А., Крылов А.А. Совершенствование автоматизированных средств определения режимов работы и расчета параметров системы тягового электроснабжения // Наука и образование транспорту. 2021. № 2. С. 66–69. EDN: TWNCGM.
13. Серебряков А.С., Герман Л.А., Осокин В.Л., Субханвердиев К.С. Совместный расчет систем тягового и внешнего электроснабжения для режимов тяговой нагрузки и короткого замыкания // Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. № 3. С. 6–12. EDN: XZROUX.
14. Пинчуков П.С., Макашева С.И. Амплитудно-частотный спектр тока как инструмент идентификации режима работы системы тягового электроснабжения // Электротехника. 2023. № 9. С. 61–67.
15. Пинчуков П.С., Макашева С.И. Моделирование режимов системы тягового электроснабжения с оценкой эффективности работы защиты // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2022. № 2. С. 58–64.
16. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu. Assessment of the repair modes impact on the system of external power supply system on throughput capacity of traction power supply system // International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021 (Sochi, 5–11 September 2021). Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021. P. 503–508. https://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537316. EDN: ALYPWS.
17. Yang Hongjun, Du Xiong, Chen Bin, Cao Yuelong, Zheng Lianqing, Wang Heng. The influence of electrified railway traction power supply system on the power quality of regional power grid // IEEE International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering. 2023. https://doi.org/10.1109/ICSECE58870.2023.10263369.
18. Aoyang Han, Litao Yu, Li Wang, Xu Jia, Wenhui Sun, Yunfan Bi. Research on the influence of urban metro traction power supply system on power grid harmonics // First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems. 2017. https://doi.org/10.1109/EIIS.2017.8298567.
19. Xishan Yu. General mathematical model of ac traction power supply system simulation based on mathematical reasoning and its application research // IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems. 2020. https://doi.org/10.1109/ICAIIS49377.2020.9194938.
20. Zhao Yan, Dai Ning Yi, An Bao. Application of three-phase modular multilevel converter (MMC) in co-phase traction power supply system // IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific. 2014. https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2014.6941064.
21. Peng Qi, Piao Zhengguo, Lu Yuhao, Li Chen. Analysis of operation data of traction power supply system of high-speed railway // International Conference on Information Science, Parallel and Distributed Systems. 2021. https://doi.org/10.1109/ISPDS54097.2021.00027.
22. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем: монография. Иркутск: ИРГУПС, 2005. 273 с. EDN: PTVITA.
23. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат: монография. М.: Директ-Медиа, 2023. 156 с.
24. Крюков А.В., Суслов К.В., Черепанов А.В., Нгуен Куок Хиеу. Моделирование режимов электрических сетей, питающих тяговые подстанции постоянного тока // Энергетик. 2024. № 2. С. 9–13. EDN: ENWOEH.
25. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими трансформаторами. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2017. 168 с.
26. Арсентьев Г.О., Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Управление режимами систем электроснабжения железных дорог на основе технологий интеллектуальных сетей (Smart Grid): монография. Иркутск: ИрГУПС, 2019. 412 с. EDN: MXYZNT.
27. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Shafikov A.R. Modeling non-sinusoidal modes in electrical networks supplying power to traction substations for electromotives operation with four-quadrant converters // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Chelyabinsk, 1–3 October 2019). Chelyabinsk: IEEE, 2019. P. 394–398. https://doi.org/10.1109/URALCON.2019.8877644.

References

1. Bocharnikov Yu.V. Modeling of a traction power supply system to assess electromagnetic compatibility with adjacent systems. *Technologies of electromagnetic compatibility*. 2008;1:45-55. (In Russ.). EDN: TEECDR.
2. Baranov I.A., Agunov A.V. Modeling reactive power compensation in a traction power supply system using Matlab-Simulink. *Intellectual Technologies on Transport.* 2021;2:5-12. (In Russ.). EDN: IRFFJT.

3. Konstantinova Yu.A., Lee V.N., Konstantinov A.M. Simulation model of electricity transit through the electric traction network. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Alejhema*. 2019;4:70-76. (In Russ.). EDN: AHXFBO.
4. Garanin M.A., Blinkova S.A. The traction power supply system modeling using the energy storage. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2023;2:85-90. (In Russ.). https://doi.org/10.46973/0201-727X_2023_2_85. EDN: TUOYML.
5. Garanin M.A., Boshkareva T.V., Frolenkov S.A. Modeling an AC traction power supply system to handle heavy trains. *Vestnik transporta Povolzh'ya*. 2016;5:22-27. (In Russ.). EDN: XDCFQF.
6. Zemskiy D.R., Sychenko V.G., Bosyi D.O. Simulation of the parallel operation of external and railway AC traction power supply system taking into account unbalanced conditions. *Technical Electrodynamics*. 2020;2:74-85. https://doi.org/10.15407/techned2020.02.074. EDN: SHVTVO.
7. Komyakov A.A., Komyakova T.V., Shkulov A.I. Application of a probabilistic approach for the formation of an electric traction load graph in the simulation of a traction power supply system. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2023;4:184-192. (In Russ.). https://doi.org/10.46973/0201-727X_2023_4_184. EDN: JLRHET.
8. Kostin A.P., Pinchukov P.S. Software analysis for modeling emergency conditions in the traction power supply system. In: *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke: trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii tvorcheskoj molodezhi s mezhdunarodnym uchastiem = Scientific, technical and economic cooperation of Asia-Pacific countries in the 21st century: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference of creative youth with international participation.* 18–21 Aprl 2023, Khabarovsk. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University; 2023, vol. 2, p. 23-28. (In Russ.).
9. Kosarev A.B., Rudashevskij R.A., Rudashevskaya A.V., Smolin P.I., Rebrov I.A. Determination of working capacity and modeling of operating modes of traction power supply systems. *Nauka i obrazovanie transportu*. 2021;2:21-26. (In Russ.). EDN: QVSYUW.
10. Zagorskij V.A., Pakulin A.G., Put'ko V.F. Modeling of the AC traction power supply. *Vestnik transporta Povolzh'ya*. 2012;3:11-15. (In Russ.). EDN: PJZELP.
11. Bykadorov A.L., Zhukov A.V. Mathematical modelling electric processes dynamics in power supply system. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2010;3:141-145. (In Russ.). EDN: MVCDBZ.
12. Rudashevskij R.A., Rudashevskaya A.V., Smolin P.I., Rebrov I.A., Krylov A.A. Improving automated means to determine operating modes and calculating parameters of the traction power supply system. *Nauka i obrazovanie transportu*. 2021;2:66-69. (In Russ.). EDN: TWNCGM.
13. Serebryakov A.S., German L.A., Osokin V.L., Subhanverdiev K.S. Combined calculation of traction and external power supply systems for traction load and short circuit conditions. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*. 2018;3:6-12. (In Russ.). EDN: XZROUX.
14. Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Amplitude-frequency spectrum of current as a tool to identify the operating mode of a traction power supply system. *Russian Electrical Engineering*. 2023;9:61-67. (In Russ.).
15. Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Modeling of traction power supply system modes with assessment of protection efficiency. *Pacific Rim countries transportation system*. 2022;2:58-64. (In Russ.).
16. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu. Assessment of the repair modes impact on the system of external power supply system on throughput capacity of traction power supply system. In: *International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021*. 5–11 September 2021, Sochi. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2021, p. 503-508. https://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537316. EDN: ALYPWS.
17. Yang Hongjun, Du Xiong, Chen Bin, Cao Yuelong, Zheng Lianqing, Wang Heng. The influence of electrified railway traction power supply system on the power quality of regional power grid. In: *IEEE International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering*. 2023. https://doi.org/10.1109/ICSECE58870.2023.10263369.
18. Aoyang Han, Litao Yu, Li Wang, Xu Jia, Wenhui Sun, Yunfan Bi. Research on the influence of urban metro traction power supply system on power grid harmonics. In: *First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems*. 2017. https://doi.org/10.1109/EIIS.2017.8298567.
19. Xishan Yu. General mathematical model of AC traction power supply system simulation based on mathematical reasoning and its application research. In: *IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems*. 2020. https://doi.org/10.1109/ICAIIS49377.2020.9194938.
20. Zhao Yan, Dai Ning Yi, An Bao. Application of three-phase modular multilevel converter (MMC) in co-phase traction power supply system. In: *IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific*. 2014. https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2014.6941064.
21. Peng Qi, Piao Zhengguo, Lu Yuhao, Li Chen. Analysis of operation data of traction power supply system of high-speed railway. In: *International Conference on Information Science, Parallel and Distributed Systems*. 2021. https://doi.org/10.1109/ISPDS54097.2021.00027.
22. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Multi asymmetrical modes of electric systems*. Irkutsk: Irkutsk State Transport University; 2005, 273 p. (In Russ.). EDN: PTVITA.
23. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates*. Moscow: Direkt-Media; 2023, 156 p. (In Russ.).
24. Kryukov A.V., Suslov K.V., Cherepanov A.V., Nguen Kuok Hieu. Modeling the modes of DC traction electrical networks. *Energetik*. 2024;2:9-13. (In Russ.). EDN: ENWOEH.
25. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. *Modeling of traction power supply systems equipped with balun transformers*. Moscow; Berlin: Direct-Media; 2017, 168 p. (In Russ.).
26. Arsentiev G.O., Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. *Control of railway power supply system modes based on smart grid technologies (Smart Grid)*. Irkutsk: Irkutsk State Transport University; 2019, 412 p. (In Russ.). EDN: MXYZNT.

27. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Shafikov A.R. Modeling non-sinusoidal modes in electrical networks supplying power to traction substations for electromotives operation with four-quadrant converters. In: *International Ural Conference on Electrical Power Engineering*. 1–3 October 2019, Chelyabinsk. Chelyabinsk: IEEE; 2019, P. 394-398. (In Russ.). https://doi.org/10.1109/URALCON.2019.8877644.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крюков Андрей Васильевич,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры электроснабжения
и электротехники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет;
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
профессор кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
✉ and_kryukov@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6543-1790

Черепанов Александр Валерьевич,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
smart_grid@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-7712-9537

Нгуен Куок Хиеу,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
hieu12829@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-6969-8369

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey V. Kryukov,
Dr. Sci (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Power Supply
and Electrical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
Professor of the Department of Transport
Electrical Engineering,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia
✉ and_kryukov@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6543-1790

Aleksandr V. Cherepanov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Transport Electrical Engineering,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia
smart_grid@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-7712-9537

Quoc Hieu Nguyen,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
hieu12829@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-6969-8369

Вклад авторов

Крюков Андрей Васильевич является членом редакционной коллегии журнала « iPolytech Journal» с 2000 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Contribution of the authors

Andrey V. Kryukov has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2000, but she was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors did not report any other conflicts of interest.

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.03.2024 г.; принята к публикации 01.04.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 20.02.2024; approved after reviewing 25.03.2024; accepted for publication 01.04.2024.

iPolytech Journal 2024. Т. 28. № 2. С. 330-345 ISSN 2782-4004 (print)
2024;28(2):330-345 ISSN 2782-6341 (online)

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья
УДК 338.4:621.31
EDN: LKUBQW
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-330-345

Анализ подходов к объединению микросетей в энергетические сообщества

Е.В. Попова[1]✉, Н.В. Томин[2]

[1,2]Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – определить и проанализировать ключевые особенности агрегации микросетей в энергетические сообщества в зависимости от преобладания промышленных и бытовых нагрузок. В работе были использованы методы литературного обзора и мета-анализа в области планирования, моделирования и управления микроэнергетических систем и их сообществ. Также применялся методологический подход, сочетающий методы многокритериального принятия решений и искусственного интеллекта. Эффективность предлагаемого подхода продемонстрирована на примере образования двух типов энергетических сообществ, построенных применительно к реальным удаленным поселениям на побережье Японского моря, которые сочетают типично «жилые» нагрузки с промышленными. Получены результаты тестирования модели «Автономный диспетчер», построенной на основе аппарата двухуровневой оптимизации и алгоритма обучения с подкреплением Монте-Карло по поиску в дереве для оптимального экономического управления режимами работы потенциального энергетического сообщества. На нижнем уровне данной модели решается задача нахождения рыночного равновесия посредством минимизации функции общих эксплуатационных затрат. На верхнем – выбирается стратегия управления, дающая наилучшее распределение прибылей между членами сообщества. Исследовались два сценария объединения и работы микросетей поселков в энергетическом сообществе: промышленного и общественного типа. Проведенные исследования показали, что работа поселков в составе энергетических сообществ любого типа более выгодна (с экономической и экологической точек зрения), чем в индивидуальном режиме. Установлено, что при объединении поселков в энергетическое сообщество промышленного типа происходит более существенное снижение стоимости электроэнергии по показателю LCOE от нормированного значения, чем в аналогичном сообществе общественного типа (с 22 руб/кВтч до 6 руб/кВтч – против 22 руб/кВтч до 9 руб/кВтч). Анализ приведенных характеристик разных типов энергетических сообществ может помочь также и проектировщикам определить возможности, особенности и последствия от агрегации микросетей разного типа в различных территориальных и климатических условиях.

Ключевые слова: энергетическое сообщество, микросеть, возобновляемая энергия, многокритериальный выбор, многоцелевая оптимизация, обучение с подкреплением, нулевая эмиссия выбросов углерода

Финансирование. Исследование выполнено в рамках гранта Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2022-1215) с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (проект № 13. ЦКП.21.0038).

Для цитирования: Попова Е.В., Томин Н.В. Анализ подходов к объединению микросетей в энергетические сообщества // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 330–345. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-330-345. EDN: LKUBQW.

POWER ENGINEERING

Original article

Analysis of approaches to integrating microgrids into energy communities

Ekaterina V. Popova[1]✉, Nikita V. Tomin[2]

[1,2]Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. In this article, we set out to identify and analyze the key features of aggregating microgrids into energy communities, with a focus on the predominance of industrial or residential loads. Research methods included a literature review and meta-analysis in the field of planning, modelling and management of microenergy systems and their communities. In addition, a methodological approach combining multi-criteria decision-making methods and artificial intelligence was used. The efficiency of the approach was demonstrated by the establishment of two types

© Попова Е.В., Томин Н.В., 2024

of energy communities for remote settlements on the Sea of Japan coast, which integrated residential and industrial loads. The "Autonomous Operator" model, which involved a two-level optimization and reinforcement learning algorithm based on Monte Carlo tree search, was tested in order to determine the optimal economic management of operation modes of the potential energy community. At the lower level, the problem of finding market equilibrium was solved by minimizing the function of total operating costs. At the upper level, the management strategy that provides the optimal profit distribution among the community members was selected. Two scenarios of microgrid integration and operation in an energy community were studied: industrial and public types. The research demonstrated that operating settlements as energy communities is a more economically and ecologically advantageous approach than operating them individually. The results indicated that the levelized cost of electricity (LCOE) decreased more significantly when combining settlements in an industrial-type energy community (from 22 rub/kWh to 6 rub/kWh) compared to a public-type community (from 22 rub/kWh to 9 rub/kWh). The analysis of the above characteristics of different types of energy communities can help designers to determine the possibilities, features and consequences of aggregating microgrids of different types under various territorial and climatic conditions.

Keywords: energy community, microgrid, renewable energy, multi-objective selection, multi-objective optimization, reinforcement learning, zero carbon emissions

Funding. The study was carried out under the grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 075-15-2022-1215) using the resources of the "High Temperature Contour" Shared Research Facility (project No. 13.CKP.21.0038).

For citation: Popova E.V., Tomin N.V. Analysis of approaches to integrating microgrids into energy communities. *iPolytech Journal.* 2024;28(2):330-345. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-330-345. EDN: LKUBQW.

ВВЕДЕНИЕ

Агрегация конечных потребителей, которые производят, потребляют и обмениваются излишками энергии в пределах одного и того же географического периметра, выражает новый способ использования возобновляемой энергии, представленный энергетическими сообществами (ЭСО). При этом в качестве таких потребителей могут выступать как промышленные, так и «жилые» общественные микросети, которые действуют как единый управляемый объект по отношению к внешней электрической сети. В зависимости от преобладающего типа и характера активных потребителей (промышленные предприятия, жилые дома, фермерские хозяйства и пр.), их объединение в группы микросетей в ЭСО может иметь разные причины и цели [1–24], такие как потребительский спрос в энергетической автономии, снижение высоких тарифов на электроэнергию, повышение отказоустойчивости и надежности энергоснабжения, минимизации выбросов загрязняющих газов в городах, более эффективное использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и пр. Часто эти задачи решаются через создание локального рынка электроэнергии с возможностью торговли электроэнергией как между отдельными микросетями (участниками ЭСО), так и с внешней энергосистемой (рис. 1).

Промышленные и «общественные» ЭСО – два типа энергосообществ, которые возникли в результате растущего интереса к устойчивым и децентрализованным энергетическим системам [1].

Промышленные ЭСО – это, в первую очередь, группы промышленных «системообразующих» энергообъектов, которые, как правило, работают вместе, чтобы оптимизировать использование энергии и снизить ее воздействие на окружающую среду. Во вторую очередь в их состав могут дополнительно (но не обязательно) входить «жилые» нагрузки населения и небольшие предприятия других категорий, например, сельхозназначения. Обычно эти сообщества состоят из объектов одной или разных промышленных и/или коммерческих отраслей и могут совместно использовать энергетические ресурсы и инфраструктуру для повышения эффективности и снижения затрат. Например, группа заводов может совместно использовать ТЭЦ для выработки электроэнергии и тепла или совместно применять ВИЭ для удешевления производства электроэнергии. Общими характеристиками таких ЭСО являются тенденции перехода от традиционных технологий производства энергии к более экологичным и безопасным – с ВИЭ, обязательное использование систем накопления энергии с целью сглаживания прерывистого характера выработки энергии от ВИЭ и удовлетворения повышенных (по сравнению с общественными микросетями) требований по надежности систем энергоснабжения, а также коллективное инвестирование в системы ВИЭ и системы накопителей для со-

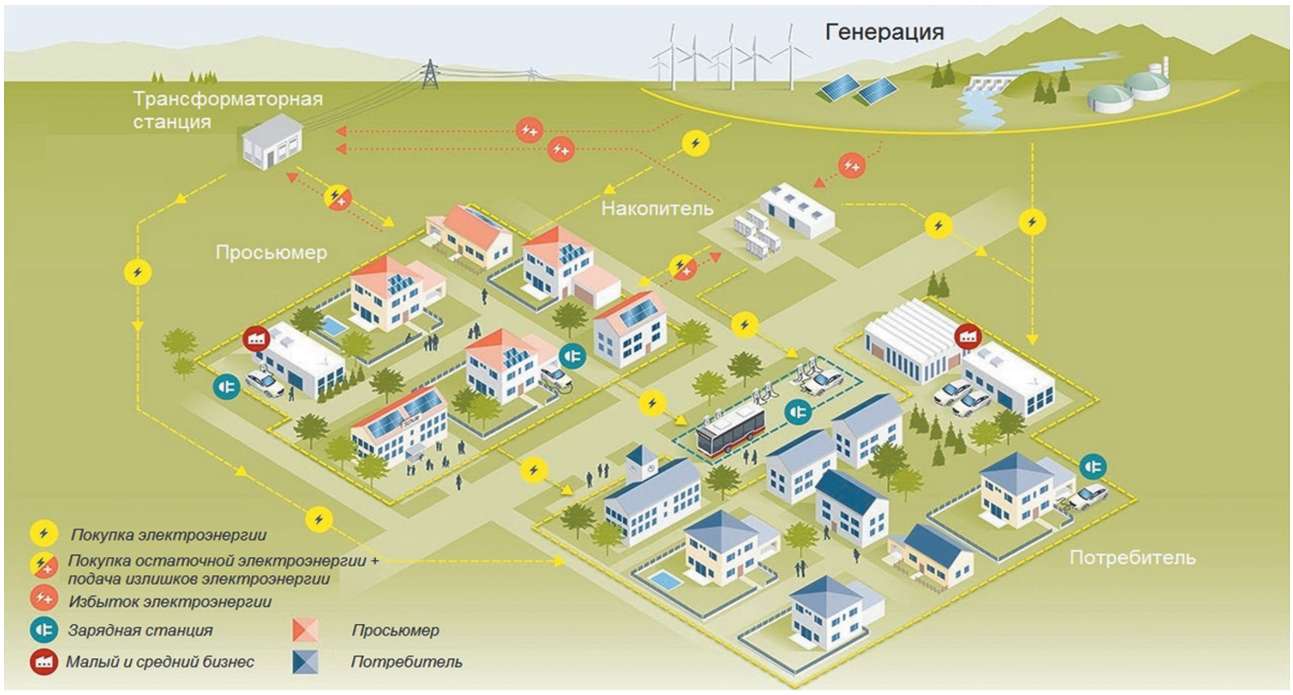


Рис. 1. *Пример агрегации двух микросетей в энергетическое сообщество с организацией локального рынка электроэнергии*
Fig. 1. *An example of two microgrids aggregated into an energy community with the organized local electrical energy market*

кращения капитальных и эксплуатационных затрат.

Понятно, что переход от энергии, основанной на ископаемом топливе, к электроэнергии из ВИЭ (к которым относятся в том числе газогенераторные установки – ГГУ) требует масштабных предварительных инвестиций, учитывая значительно более высокие потребности и базовые нагрузки в промышленном секторе, чем в других секторах (например, в застроенной среде). Высокая затратность тормозит продвижение таких проектов как со стороны средних, так и крупных промышленных компаний. Эффективным способом преодоления этого инвестиционного препятствия может явиться коллективное инвестирование в системы ВИЭ и создание так называемой «общественной энергетики» среди компаний промышленного кластера, что поможет сократить затраты почти до 30% [2], а также существенно снизить потери мощности во всей сети.

Другой тип ЭСО, представляющий собой агрегацию общественных микросетей, обычно включает такие «системообразующие» элементы, как группы домохозяйств и/или фермерских хозяйств, а также может дополнительно охватывать «общественные» объекты общественного питания, развлечения и проживания населения, которые работают вместе, чтобы производить и потреблять энергию более устойчивым и эффективным способом. Эти сообщества также организованы вокруг общих ВИЭ (включая ГГУ), а также могут быть (но не обязательно) организованы вокруг общих систем накопления энергии, которые позволяют домохозяйствам «хранить» и оптимально управлять избыточной энергией, например, вырабатываемую солнечными ФЭП на крыше. Работая вместе, домашние и/или фермерские хозяйства в общественном ЭСО могут сократить свои счета за электроэнергию, повысить собственную энергетическую безопасность и уменьшить свой углеродный след. Дополнительными принципами организации и работы таких ЭСО являются принципы социальной справедливости и максимальной сервисной обеспеченности всех слоев населения, поскольку выравнивание графиков генерации и нагрузки здесь зачастую осуществляется за счет создания дополнительных услуг населению.

Понятно, что разграничения между двумя типами ЭСО в некоторой степени условны, поскольку исторически первыми стали «смешанные» ЭСО, включающие элементы общественных и промышленных сообществ.

В основном это ЭСО изолированных территорий (например, Крайнего Севера), не имеющих связи с внешними энергосистемами, где общая генерация и нагрузка составляются из ограниченного числа элементов, имеющихся в наличии. Во многих зарубежных странах наибольшую популярность приобрели разнообразные общественные ЭСО, в которых почти все акционеры являются домашними хозяйствами и малыми предприятиями [3]. Правительства этих стран вводят различные механизмы стимулирования развития таких ЭСО. Напротив, в России создана регуляторная база для развития преимущественно промышленных ЭСО. Первым шагом в этом направлении стало появление концепции промышленных микросетей – активных энергетических комплексов (АЭК) в системах внутреннего электроснабжения промышленных предприятий[3]. Под АЭК в данном случае понимаются коммерческие микросети, связанные с ЕЭС РФ, в состав которых входит не участвующая в оптовом рынке генерация мощностью до 25 МВт, и не входит жилая нагрузка населения. К настоящему времени уже созданы и работают промышленные и коммунальные локальные интеллектуальные энергосистемы (пока только на уровне микросетей): ПАО «Сургутнефтегаз»; «Нижнетагильский металлургический комбинат»; АЭК в г. Тихвин; Мини-ТЭЦ «Березовая» 10 МВт в г. Новосибирск; Мини-ТЭЦ «Сфера» 7,2 МВт в г. Южно-Сахалинск [25]. При этом важно отметить, что индивидуальной концепции построения различных видов ЭСО в РФ пока еще нет. Но наработанный зарубежный опыт применим и в России. А вовлечение частных инвесторов в развитие распределенной энергетики формирует в РФ сферу малого энергетического бизнеса, конкурирующего с традиционным крупным, а также содействует развитию конкуренции и повышению эффективности деятельности этого бизнеса [23, 24].

Основная структура излагаемой статьи включает описание причин и целей объединения различных типов микросетей в группы в рамках ЭСО, оценку ключевых особенностей создания и функционирования ЭСО промышленных и общественных микросетей с жилыми нагрузками. В работе также представлен простой экспериментальный пример создания и функционирования ЭСО с разными категориями потребителей, цели которых достигаются за счет применения методов многокритериального принятия решений и искусственного интеллекта.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООБЩЕСТВ

В общем случае ЭСО технически представляет собой группу микросетей или объектов, которые имеют электрическую связь друг с другом и действуют как единый управляемый объект по отношению к внешней электрической сети. ЭСО может подключаться к внешней сети, как показано на рис. 2 [1], или не иметь такой связи и работать в изолированном режиме (например, в Арктике). Такое сообщество обычно основано на открытом и добровольном участии, в той или иной степени автономно и эффективно контролируется акционерами или участниками, находящимися в непосредственной территориальной близости от проектов ВИЭ, которые также принадлежат и разрабатываются этими лицами. Под акционерами или участниками здесь понимаются в случае «общественных» ЭСО простые физические лица, малые предприятия и местные органы власти (включая муниципалитеты). В случае промышленных ЭСО это, как правило, нанятые профессиональные юристы и экономисты.

Следует отметить, что разделение между промышленными и общественными ЭСО возникло в Российской и зарубежной литературе в последние 2–3 года, и к настоящему времени нет их четко определенных понятий и разграничений между ними. Анализ литературных источников на эту тему показывает, что разработано немало классификаций ЭСО (например, таких как в [25]), но наиболее оправданной, с точки зрения авторов предлагаемой работы, является классификация, согласно которой название и назначение сообществ определяется, главным образом, типом основных «системообразующих» потребителей, которые также являются и совладельцами ВИЭ, и соуправленцами ЭСО, и

[3]Active energy complexes are the first step towards industrial microgrids in Russia. 2020. Режим доступа: https://energynet.ru/tpost/2lz89pszd1-active-energy-complexes-are-the-first-st (дата обращения: 17.02.2024).

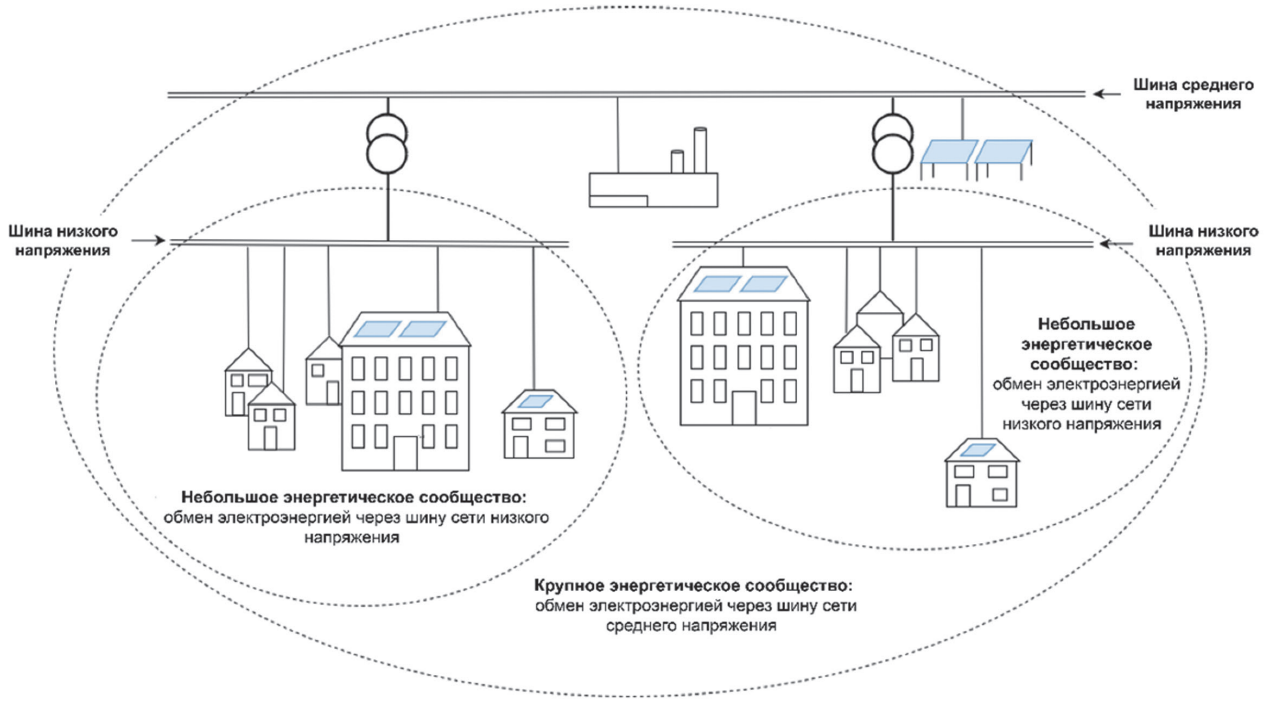


Рис. 2. *Пример энергетического сообщества с возобновляемым источником энергии, имеющим связь с внешней энергосистемой через шину среднего напряжения*
Fig. 2. *An example of an energy community with a renewable energy source connected to an external power grid via a medium voltage bus*

инициаторами их создания. (Это принцип так называемой «революции снизу вверх» в действии.) Поэтому группа со-организующихся промышленных объектов обычно составляет промышленное ЭСО, группа объектов, имеющих отношение к населению и обществу – общественное ЭСО. ЭСО изолированных и удаленных территорий зачастую являются промежуточным (смешанным) вариантом.

Ярким примером успешного проекта «смешанных» ЭСО является немецкая деревня Фельдхайм, где удалось добиться фактически полной энергоавтономии и самых низких тарифов на электроэнергию в Германии. Участники сообщества изначально преследовали сразу несколько целей: энергетическая автономия, снижение тарифа и минимизация выбросов загрязняющих газов [19]. И достигли их. Большая часть электроэнергии в Фельдхайме вырабатывается ветроэнергетическими установками и солнечной электростанцией. В случае нехватки энергии от ВИЭ в ход идет биогазовая установка, вырабатывающая до 500 кВт электроэнергии и 500 кВт тепловой энергии, сырьем для которой служат отходы фермерского хозяйства: коровий и свиной навоз, отходы от кукурузы и пшеницы. Также в сообществе предусмотрена резервная газогенераторная электростанция, которая применяет древесные отходы местного лесного хозяйства. Используется интеллектуальная система управления распределенными источниками энергии. В данном случае, если фермерские объекты скотный двор и посевы зерновых являются «системообразующими» (а также инициаторами создания ЭСО, соуправленцами и совладельцами ВИЭ), то сообщество объектов можно квалифицировать как общественное ЭСО. Если «системообразующим» является предприятие деревообрабатывающей отрасли, то ЭСО – промышленное.

Существует значительный объем литературных источников по коллективному производству электроэнергии из ВИЭ в разнообразных локальных ЭСО домохозяйств, фермерских хозяйств и малых предприятий, которые по основному признаку (типу «системообразующих» нагрузок) также ближе к смешанному типу. Многие из этих оригинальных сообществ организуются и управляются членами-совладельцами, которые разделяют «оригинальные» ценности, например, связанные с конкретной пространственной территорией, или имеют общие экологические принципы или социальные атрибуты.

Они, как правило, участвуют в коллективных инвестициях – организуют «энергетические кооперативы» и, следовательно, пользуются определенными материальными преимуществами в этих кооперативах и ЭСО [5–7].

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООБЩЕСТВА С ЖИЛЫМИ НАГРУЗКАМИ

Чтобы осуществить промышленный переход на ВИЭ, промышленные предприятия могут рассмотреть возможность инвестирования в генерацию ВИЭ и инфраструктуру по отдельности, что будет осложнено высокими первоначальными инвестиционными затратами. Альтернативным решением является коллективное инвестирование, которое позволяет разделить затраты между участниками, а также административные усилия (например, получение разрешений на строительство электростанции на ВИЭ). Поэтому, несмотря на трудности, связанные с коллективным принятием решений и механизмами координации решений, такой подход является экономически и идеологически выгодным для ЭСО.

Примером такой выгоды является ЭСО с совместным инвестированием в промышленной зоне Беневенто на юге Италии [18], где промышленные «системообразующие» нагрузки (завод по очистке промышленных сточных вод и многофункциональное здание) дополняются «жилыми» нагрузками сотрудников. Исследование работы созданного ЭСО показало, что совместное использование энергии ВИЭ разными категориями потребителей увеличивает собственное потребление энергии и самодостаточность потребителей. При этом ежегодные выбросы углекислого газа снижаются на 84 т, а эксплуатационные расходы – на 101 тыс. евро. В противоположность большинству позитивных оценок исследование [21] показало, что использование ВИЭ ветроэнергетических установок (ВЭУ) и ГГУ на биомассе нецелесообразны для агрогородка в Индонезии, сочетающего промышленные и «жилые» нагрузки, поскольку скорость подачи энергоресурсов от ВИЭ здесь не соответствует минимальным требованиям для работы технологий ГГУ и ВЭУ. При этом приемлемым вариантом является централизованная система энергоснабжения и резервные дизельные генераторы.

Идея сотрудничества между промышленными компаниями не нова. Существуют многочисленные исследования о «промышленном симбиозе» – типе сотрудничества, при котором промышленные компании обмениваются как ресурсами, так и побочны-

Рис. 3. *Пример промышленного энергетического сообщества в г. Вайц (Австрия)*
Fig. 3*. An example of an industrial energy community in the town of Weitz, Austria*

ми продуктами производства [8]. Сотрудничество в этом случае помогает оптимизировать потребление ресурсов, а также получение экономических и экологических выгод для всех участников [9]. Зачастую к такому сотрудничеству, в первую очередь ориентированному на совместное производство электроэнергии и управление спросом, предъявляются дополнительные требования, например, «доверие» [10], «экономические выгоды» [11] или «дух сообщества» [12], которые кажутся в равной степени актуальными. В то же время физико-технические требования, например, географическая близость объектов, которая обычно является ключевым элементом сотрудничества [13], могут оказаться менее существенными в этих энергосообществах в связи с тем, что электроэнергия в них передается от коллективной электростанции к предприятиям через уже существующую электросеть.

ОБЩЕСТВЕННЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООБЩЕСТВА

Для общественных ЭСО наиболее приемлемым является коллективное инвестирование самих жителей в проекты ВИЭ и инфраструктуру. Наиболее передовые и креативные практики построения этих ЭСО возникли на территориях Великобритании, Нидерландов, США и Австралии. В России такие проекты пока не реализованы и не разработаны. Отличительная черта таких ЭСО – более активное совместное использование активов местной энергетики, которое может быть организовано множеством путей – от кооперативной собственности на активы до создания локальных рынков. Так, свой проект управления гибкостью в ЭСО Великобритании начал работу в г. Бетесда, где реализована схема коллективных инвестиций жителей в строительство ГЭС небольшой мощности, а также действует модель мотивации жителей к тому, чтобы потреблять электроэнергию в первую очередь от этой ГЭС в те часы, когда ее выработка максимальна, а цена на электроэнергию минимальна[4].

Свои особенности также имеют ЭСО Нидерландов. Согласно требованиям, создаваемые микрогриды таких сообществ должны быть частью архитектуры городов и населенных пунктов. Причем особенность создаваемых «городских» микрогридов заключается в том, что они имеют в своем составе широчайший набор разнообразных элементов как нагрузки, так и альтернативной генерации, продуктивная работа которых невозможна без интеллектуальных систем управления. При этом «городские» ЭСО могут не иметь в своем составе накопители энергии, поскольку стремятся выравнивать графики генерации и нагрузки за счет высокой синергии широчайшего набора разнообразных элементов нагрузки и альтернативной генерации (например, кафе и зарядные станции электромобилей). Эффективная работа таких ЭСО невозможна без интеллектуальных систем управления. Поэтому энергокомпании Spectral и Metabolic по заданию правительства Нидерландов разработали и исследовали ряд сценариев работы таких ЭСО, работающих под управлением интеллектуальных систем управления SIDE и SmartHoods [15, 16]. Было разработано девять сценариев работы новаторских ЭСО с различным составом генерации и нагрузок: для коммуны De Ceuvel, состоящей из старых барж, поднятых на сушу; плавающей застройки Schoonschip; бывшей промзоны на окраине Амстердама – Republica Papaverweg и экопоселка Aardehuizen – «Земные корабли», показанного на рис. 4.

Напротив, главная задача американского рынка сообществ микрогридов заключается в обеспечении надежности электроснабжения в случае природных стихийных бедствий, а также в создании экологичной альтернативы для резервных дизельных генераторов, используемых при отключении основного электроснабжения. Так, в целях предотвращения длительных отключений во время лесных пожаров были созданы микрогриды в городах Голета, Калистога и в районе Монтесито в Санта-Барбаре[5]. Сообщества этих микрогридов создавались посредством совместных инвестиций жителей, особенно заинтересованных в обеспечении надежности электроснабжения, поскольку их города питаются от энергосистемы по длинным линиям, которые проходят по труднодоступной

[4]Bethesda energy club shares hydro power in UK first // BBC. 2016. Режим доступа: https://www.bbc.com/news/uk-wales-38236414 (дата обращения: 19.02.2024).

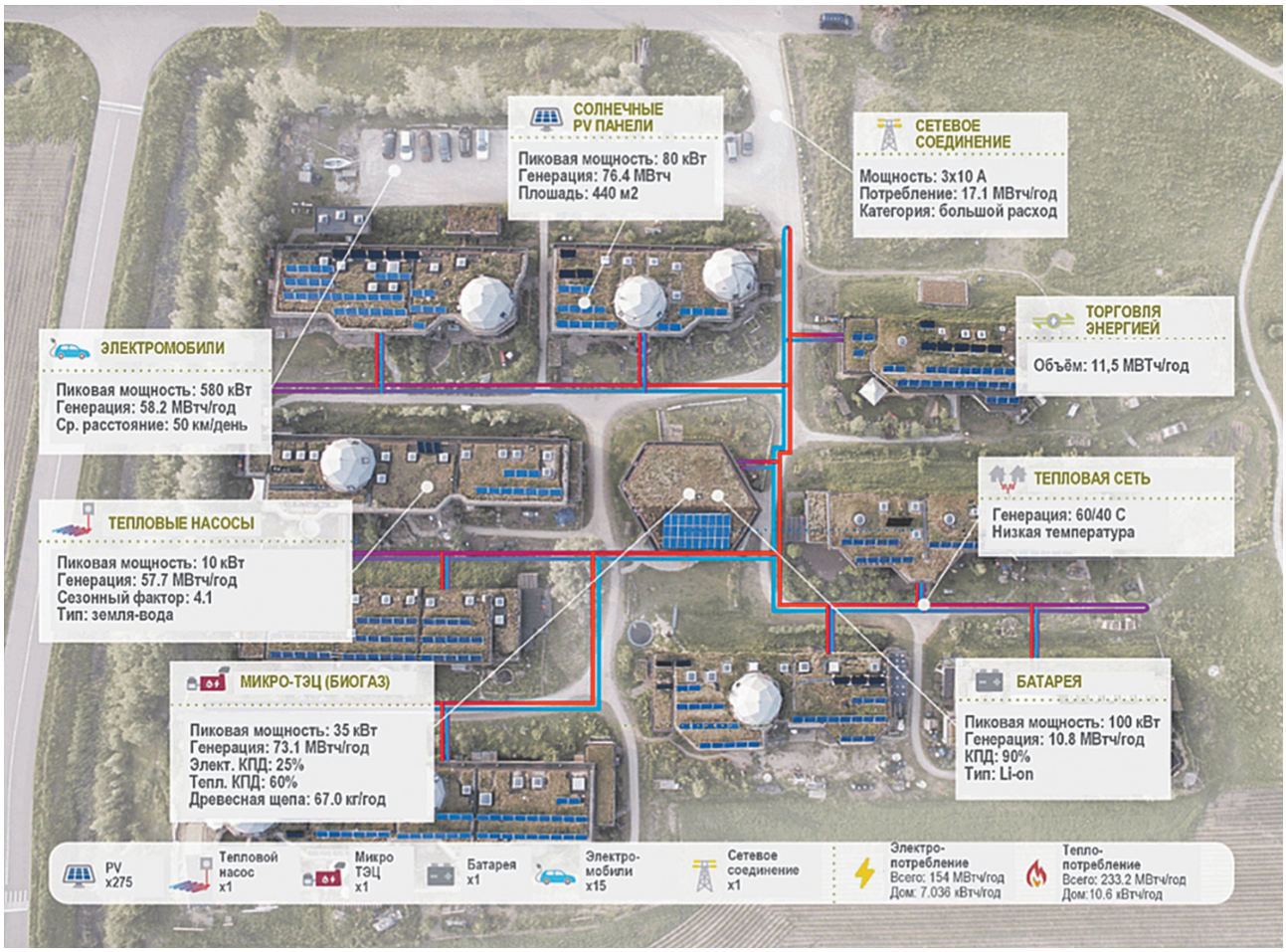


Рис. 4. *Пример «общественного» энергетического сообщества «Земные корабли». Адаптировано из [26]*
Fig. 4. *An example of the "public" energy community "Earth ships". Adapted from [26]*

лесистой или горной местности, и риск аварий на которых в период лесных пожаров особенно велик, а потому они первыми попадут под превентивное отключение.

КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ АГРЕГАЦИИ МИКРОСЕТЕЙ В РАЗНЫЕ ТИПЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СООБЩЕСТВА

На основании вышеизложенного анализа можно выделить несколько ключевых особенностей создания и функционирования промышленных и «общественных» ЭСО с жилыми нагрузками:

1. Масштаб: промышленные ЭСО, как правило, крупнее (масштабнее), чем «общественные» ЭСО, поскольку они включают несколько промышленных объектов, работающих вместе, для оптимизации их энергопотребления. «Общественные» ЭСО, как правило, менее масштабные и включают домохозяйства или фермерские хозяйства, работающие вместе для производства и потребления энергии.

2. Источники энергии: промышленные ЭСО часто полагаются на традиционные источники энергии, такие как природный газ, уголь или нефть, а также крупные ВИЭ, такие как ветрогенераторы и солнечные панели. В противоположность небольшие «общественные» ЭСО в первую очередь будут полагаться на газогенераторы, работающие на попутном газе, полученном от переработки древесины, продукции сельского хозяйства, теплиц, мусорных полигонов и т.д., т.е. сопутствующих предприятий сельхозназначения, входящих в состав этих ЭСО; а во вторую очередь – на солнечные панели небольшой мощности на крышах строений. И только крупные богатые

[5]Energy Central. Achieving resilience through renewables-driven Community Microgrids. Режим доступа: https://energycentral.com/c/ec/achieving-resilience-through-renewables-driven-community-microgrids (дата обращения: 17.02.2024).

«общественные» ЭСО предпочтут вкладывать деньги в строительство ветрогенераторов на паевых условиях.

3. Инфраструктура: Промышленным ЭСО часто требуется значительная инфраструктура для совместного использования энергетических ресурсов и оптимизации использования энергии, например, общие ТЭЦ или ВИЭ. «Общественным» ЭСО может потребоваться меньше инфраструктуры, но тем не менее необходимо координировать производство и накопление энергии между домохозяйствами.

4. Собственность и управление: промышленные ЭСО могут принадлежать и профессионально управляться одним юридическим лицом, например, коммунальным предприятием или группой промышленных объектов. «Общественные» ЭСО часто принадлежат самим домохозяйствам и коллективно управляются ими, что может создавать проблемы в отношении управления и принятия решений.

5. Экономические модели: промышленные ЭСО могут действовать в соответствии с различными экономическими моделями, такими как соглашения о покупке электроэнергии или соглашения о совместных сбережениях. «Общественные» ЭСО могут работать по модели кооператива или общественной собственности.

6. Способы выравнивания графиков нагрузки и генерации в основном определяются требованиями по надежности энергоснабжения потребителей, которые для промышленных предприятий, входящих в состав промышленных ЭСО выше, чем для других категорий потребителей. Поэтому в этих ЭСО, а также во всех ЭСО изолированных территорий неравномерность графиков генерации и нагрузки компенсируется с помощью накопителей разного типа. В чисто «городских» ЭСО проблему зачастую решают путем «набора» дополнительных компонентов генерации и нагрузки, попутно решая проблемы рабочих мест, социального развития территорий и сервисной обеспеченности населения.

Дополнительно к особенностям каждого типа ЭСО имеет смысл рассмотреть также их общие характеристики, которые заключаются в следующем [20]. При проектировании ЭСО следует учитывать географические особенности региона расположения, поскольку они определяют либо наличие связи ЭСО с внешней энергосистемой, либо его автономность; ветро- и гелиоэнергетический потенциал определяют эффективность основных элементов генерации, таких как ФЭП и ВЭУ; сопутствующие производства повышают процент загрузки микросети, а также могут являться источником биомассы для ГГУ (например, лесное хозяйство является источником щепы для печей на пеллетах в жилых поселениях).

Анализ рассмотренных характеристик может помочь определить возможности и проблемы, связанные с промышленными и «общественными» ЭСО, и принять обоснованные решения относительно их проектирования, реализации и эксплуатации. Поэтому для решения проблемы учета множества факторов, усложняющих создание и эксплуатацию ЭСО (экономических, климатических, экологических), в [22] авторами излагаемой статьи предложен единый многокритериальный подход к созданию и управлению ЭСО с ВИЭ. Эффективность подхода продемонстрирована на примере двух типов ЭСО, состоящих из удаленных поселений на побережье Японского моря, которые сочетают типично «жилые» нагрузки с промышленными (рыбный консервный завод).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим пример изолированного ЭСО, состоящего из трех поселков (микросетей), расположенных в непосредственной близости друг от друга и сильно удаленных от централизованной электрической системы (рис. 5). Поселки имеют собственные распределенные источники энергии: дизельные генераторы (ДЭС), газогенераторы (ГГЭС), ФЭП и ветростанции (ВЭС). Также для компенсации прерывистой генерации ВИЭ во всех поселках установлены аккумуляторные батареи (АКБ). Данный пример адаптирован к реальной ситуации Приморского края, где в настоящее время энергоснабжение осуществляется от ДЭС, имеющих высокий физический износ, и необходимо рассмотреть варианты дальнейшего энергоснабжения поселков.

Исследуем два сценария объединения микросетей поселков в ЭСО, что позволит оценить преимущества от формирования промышленного и общественного сообществ:

1. Промышленный сценарий, когда Поселки 1 и 3 имеют чисто промышленную нагрузку: трехсменное и односменное предприятия, при этом Поселок 2 включает чисто жилую бытовую нагрузку (рис. 6).

2. Общественный сценарий, когда Поселки 1 и 3 уже имеют «смешанные» нагрузки, т.е. бытовую и промышленную, при этом доля последней невелика. Инициаторами и соуправленцами ЭСО являются жильцы поселков.

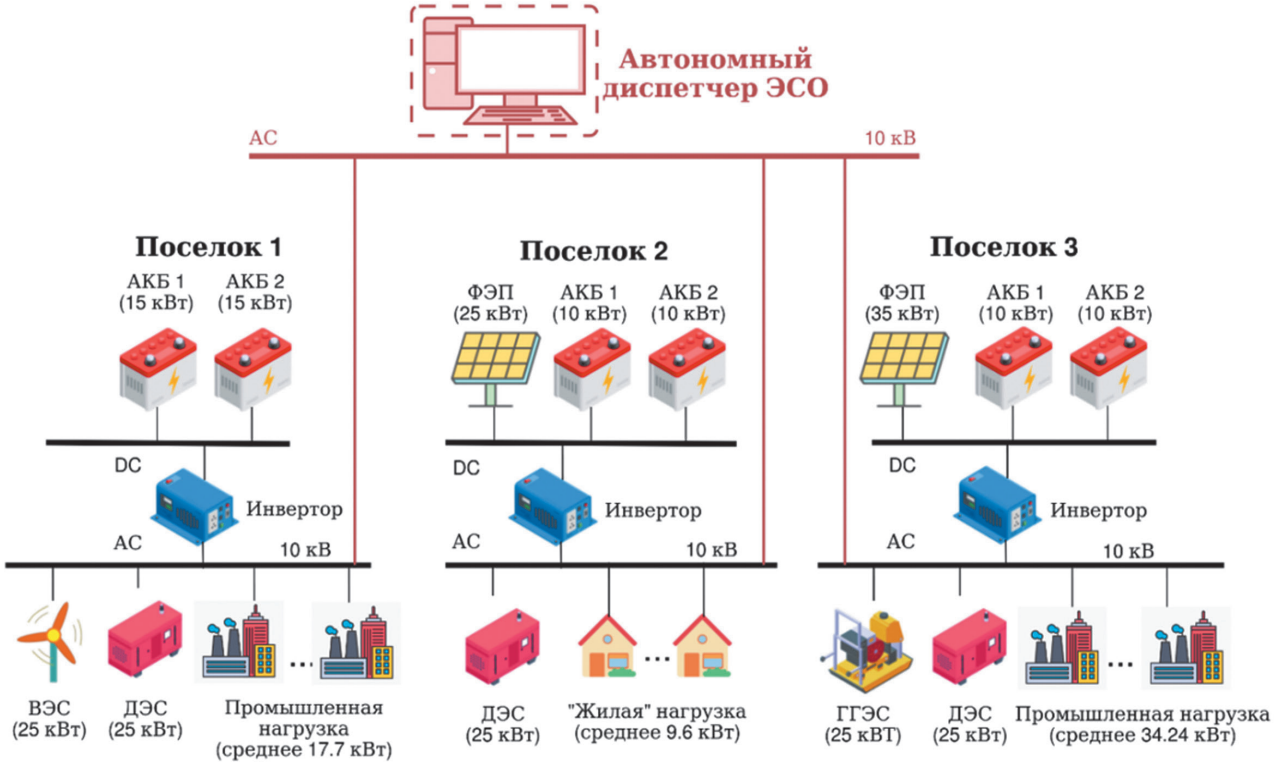


Рис. 5. *Общая схема рассматриваемого энергетического сообщества, которое включает три микросети поселков для исходного промышленного сценария*
Fig. 5. *A general scheme of the studied energy community, which includes three micro-networks of settlements for the initial industrial scenario*

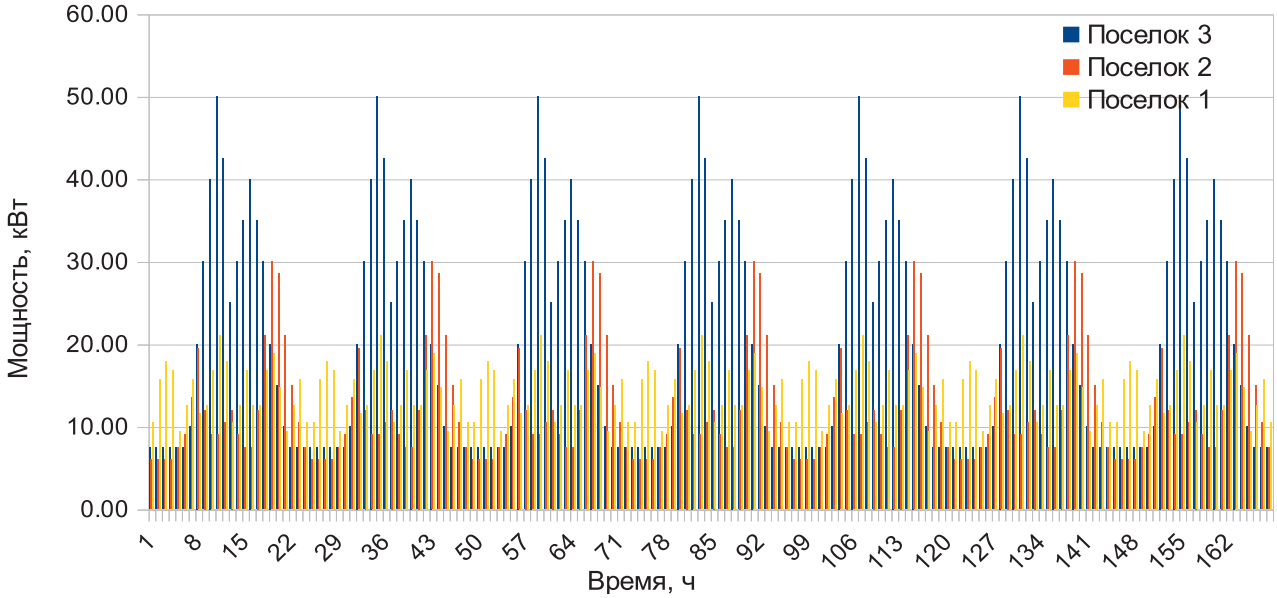


Рис. 6. *График недельного энергопотребления микросетей рассматриваемых поселков для исходного промышленного сценария*
Fig. 6. *The graph of the weekly energy consumption of microgrids of the settlements under consideration for the initial industrial scenario*

Предполагается, что ЭСО оптимально управляются программным обеспечением «Автономный диспетчер», модель которого излагалась ранее в [22, 26]. «Автономный диспетчер» использует аппарат двухуровневой оптимизации и машинного обучения, применяет алгоритм Монте-Карло по поиску в дереве, чтобы автоматически перераспределять доходы и расходы между участниками ЭСО.

На нижнем уровне решается задача нахождения рыночного равновесия для определения оптимальных объемов обмена мощностью между микросетями поселков, цены и пиковой мощности в ЭСО. При этом минимизируется функция общих эксплуатационных затрат, в которой учитываются технические, экономические и экологические критерии. На верхнем уровне реализуется принцип социальной справедливости, когда из множества возможных стратегий выбирается та, которая, согласно условию эффективности по Парето, дает справедливое распределение прибылей между членами сообщества. Для этого решается задача оптимизации – рассчитывается максимальная прибыль каждой микросети $J_{u,opt}^{SU}$, которую она могла бы получить, не вступая в ЭСО, и сравнивается по выражению (1) с прибылью каждой микросети $J_{u,opt}$ в составе ЭСО:

$$J_{u,opt} \geq J_{u,opt}^{SU} + \alpha, \quad (1)$$

где $J_{u,opt} = J_{u,opt}^{energy} + J_u^{peak}$ – общая прибыль микросети u в составе ЭСО; $\alpha \geq 0$ – резервная переменная, которую нужно максимизировать. Важно заметить, что максимизация α соответствует максимизации условия $min(J_{u,opt} - J_{u,opt}^{SU})$, т.е. минимального увеличения прибыли, достигнутого всеми участниками ЭСО. При этом если хотя бы одно неравенство в (1) выполняется строго, то состояние ЭСО называется парето-превосходным по сравнению с состоянием, когда микросети действуют индивидуально.

Результаты моделирования функционирования микросетей поселков в рамках рассматриваемых сценариев представлены в табл. 1, где выполнена оценка эффективности управления режимами микросетей поселков как при их изолированной работе (автономной друг от друга), так и в составе ЭСО.

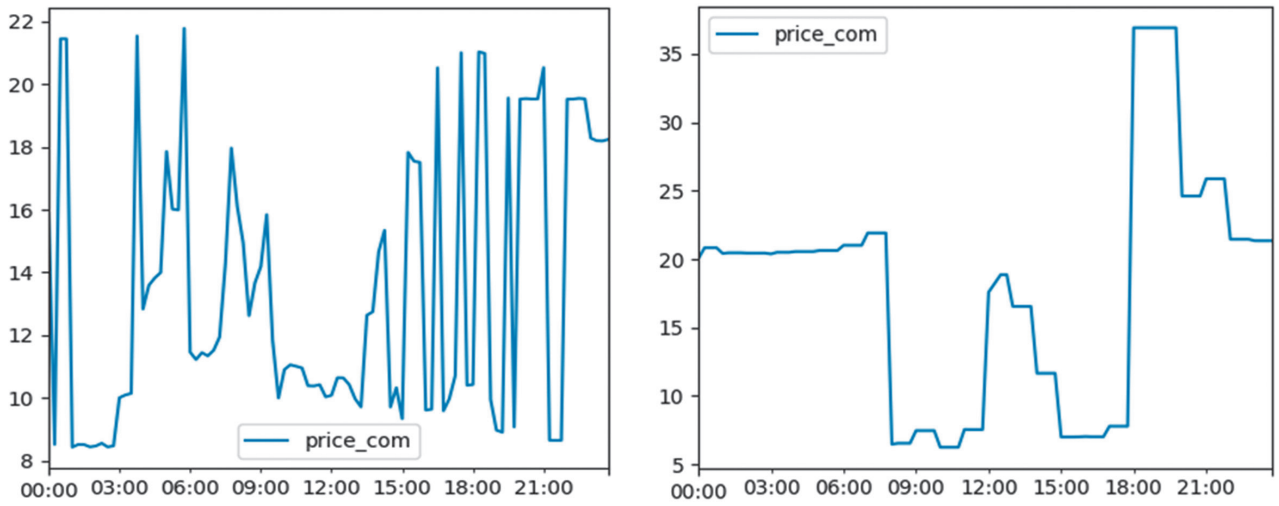
Из табл. 1 видно, что во всех случаях и сценариях работа поселков в составе ЭСО приносит большую прибыль, чем в индивидуальном режиме, т.е. работа в составе ЭСО более выгодна с экономической точки зрения (согласно формуле (1)). Этот факт способствует долгосрочной агрегации участников ЭСО. Также видно, что промышленный сценарий формирования и функционирования ЭСО влечет за собой большие затраты для Поселков 1 и 2 в сравнении с общественным сценарием. В Поселке 3 – наоборот. В целом такое положение дел ожидаемо, так как повышенная промышленная нагрузка подразумевает большие эксплуатационные затраты на ее покрытие.

Далее, сравнивались два сценария работы ЭСО по показателю *LCOE* – нормированной стоимости электроэнергии. Результаты сравнения на примере Поселка 1 показаны на рис. 7. Анализ результатов сравнения показал, что в промышленном сценарии стоимость электроэнергии в течение суток снижается (за счет активного обмена электроэнергией между микросетями) с 22 руб/кВт·ч до 6 руб/кВт·ч, что для промышленных предприятий с их повышенными нагрузками представляется значимым экономическим фактом. В общественном ЭСО стои-

Таблица 1. Сравнение суммарных недельных прибылей микросетей поселков, работающих как изолированно, так и в составе энергетического сообщества

Table 1. Comparison of the accumulated weekly profits of settlement micro-grids operating both in an island mode and as a part of an energy community

Микросети	Суммарные прибыли микросетей, руб.			
	общественный сценарий		промышленный сценарий	
	изолиров., $J_{u,opt}^{SU}$	ЭСО, $J_{u,opt}$	изолиров., $J_{u,opt}^{SU}$	ЭСО, $J_{u,opt}$
Поселок 1	341,96	669,16	-5663,35	-4595,49
Поселок 2	220,00	446,56	-769,22	-676,51
Поселок 3	-6298,45	-5161,29	793,88	1302,33

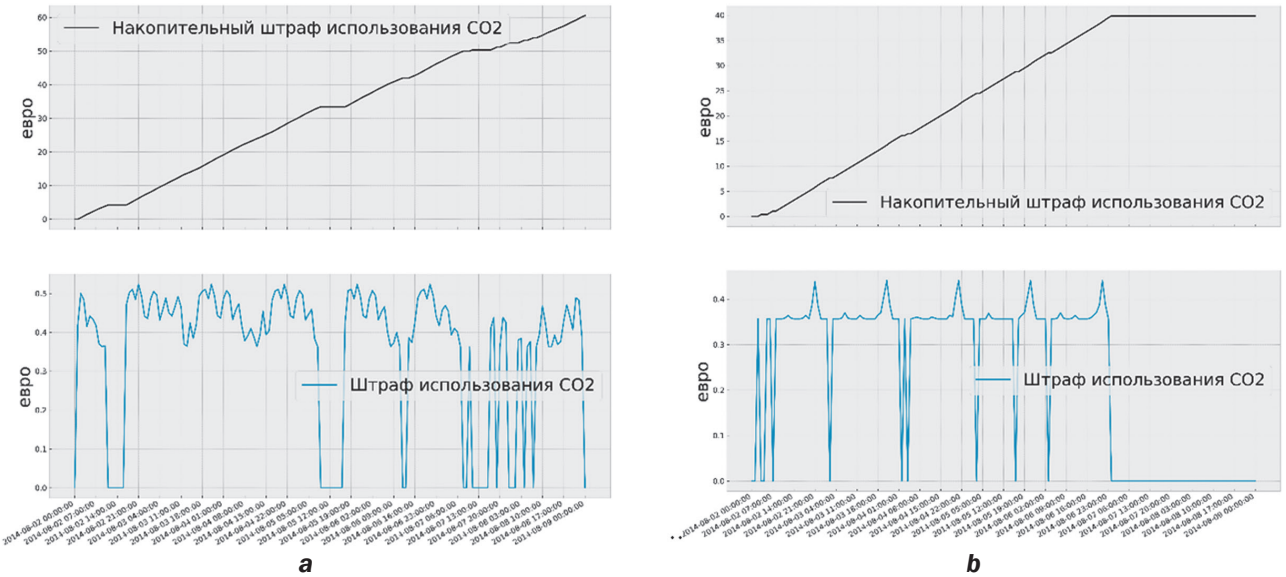


a *b*

Рис. 7. *Графики суточного изменения цены (price_com) на электроэнергию (руб/кВт·ч) в энергетическом сообществе для Поселка 1 для разных сценариев: a – общественный сценарий; b – промышленный сценарий*
Fig. 7. *Graphs of daily price variation (price_com) for electrical energy (rubles/kWh) in the energy community for the Settlement 1 for different scenarios: a – public scenario; b – industrial scenario*

Таблица 2. Накопительные штрафы за выбросы CO_2 в течение недельного тестового моделирования
Table 2. Cumulative penalties for CO_2 emissions during a week-long test simulation

Микросети	**Накопительный штраф за выбросы CO_2, руб.**	
	общественный	промышленный
Поселок 1	4400	2640
Поселок 2	2560	2720
Поселок 3	5440	6000



a *b*

Рис. 8. *Штрафы за выбросы CO_2 для Поселка 1 в течение недельного тестового моделирования: a – «общественный» сценарий; b – промышленный сценарий*
Fig. 8. *Penalties for CO_2 emissions for the Settlement 1 during a week-long test simulation: a – public scenario; b – industrial scenario*

мость электроэнергии снижается только до 9 руб/кВт·ч. Также оценивался экологический аспект в рассматриваемых сценариях ЭСО. В этом случае модель «автономного диспетчера» на нижнем уровне «старалась» минимизировать объем выбросов CO_2,

генерируемых при включении ДЭС. Стоимость этих выбросов принималась равной 0,1 евро/кВт·ч (или 8 руб/кВт·ч). При этом выбросы CO_2, которые может давать само предприятие, в процессе его работы не учитывались.

В табл. 2 показаны накопительные штрафы за выбросы CO_2 в течение недельного тестового моделирования. Из таблицы видно, что в промышленном сценарии выбросы CO_2 при включении ДЭС в Поселках 2, 3 некритично выше, чем в общественном сценарии, а в Поселке 1 – наоборот. В целом показатели сопоставимы во всех случаях.

Стоимость накопительных выбросов CO_2 для «особенного» Поселка 1 в течение недельного тестового моделирования показана на рис. 8. Снижение экологических затрат для промышленного сценария в этом случае, вероятно, связано с большей емкостью систем АКБ (Поселок 1 – 30 кВт·ч, в остальных поселках по 20 кВт·ч). Характер промышленной нагрузки позволяет в большей степени задействовать АКБ и минимизировать использование ДЭС.

Обобщение результатов моделирования двух сценариев работы ЭСО на примере поселков Приморского Края показало, что во всех случаях и сценариях работа всех поселков в составе ЭСО экономически и экологически более выгодна, чем в индивидуальном режиме; при объединении поселков в ЭСО промышленного типа происходит более существенное снижение нормированной стоимости электроэнергии *LCOE*, чем в ЭСО общественного типа; напротив, выбросы CO_2, обусловленные работой ДЭС, в промышленном ЭСО почти всегда оказываются некритично выше, чем в общественном ЭСО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ рассмотренных общих и индивидуальных характеристик разных типов энергосообществ может помочь определить возможности и проблемы, связанные с промышленными и «общественными» ЭСО и принять обоснованные решения относительно их проектирования, реализации и эксплуатации. При этом к настоящему времени нет четкого разграничения между понятиями промышленного и общественного ЭСО. В большинстве случаев они представляют собой некий смешанный тип – симбиоз, что наиболее характерно для потенциальных ЭСО удаленных и изолированных территорий (например, Крайнего Севера и Якутии), где другие варианты невозможны. При сравнении преимуществ от работы потребителей в составе микросетей определенного типа и в сообществе микросетей выявляется несомненное преимущество ЭСО смешанного типа за счет высокой синергии широкого спектра элементов генерации и нагрузки, а также накопителей энергии разного типа. Наиболее оправданной с экономической и технической точек зрения, по мнению авторов работы, является классификация ЭСО в соответствии с типом «системообразующих» нагрузок, которые являются соинвесторами, соуправленцами, а также инициаторами создания ЭСО.

Важно также отметить, что индивидуальной концепции построения различных видов ЭСО в РФ пока еще нет. Но наработанный и адаптированный зарубежный опыт применим и в России.

Список источников

1. Warneryd M., Håkansson M., Karltorp K. Unpacking the complexity of community microgrids: a review of institutions' roles for development of microgrids // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 121. P. 109690. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109690.
2. Dhabi A. Renewable power generation costs in 2017 // IRENA. International Renewable Energy Agency. Режим доступа: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA_2017_Power_Costs_2018.pdf (дата обращения: 17.02.2024).
3. Abolhosseini S., Heshmati A. The main support mechanisms to finance renewable energy development // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 40. P. 876–885. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.013.
4. Дацко К.А. Активные энергокомплексы // Энергетическая политика. 2020. № 6. С. 64–75. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_6148_64. EDN: KEVGJS.
5. Magnani N., Osti G. Does civil society matter? Challenges and strategies of grassroots initiatives in Italy's energy transition // Energy Research & Social Science. 2016. Vol. 13. P. 148–157. https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.012.

6. Gjorgievski V.Z., Cundeva S., Georghiou G.E. Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: a review // Renewable Energy. 2021. Vol. 169. P. 1138–1156. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.078.
7. Bomberg E., McEwen N. Mobilizing community energy // Energy Policy. 2012. Vol. 51. P. 435–444. https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2012.08.045.
8. Domenech T., Davies M. Structure and morphology of industrial symbiosis networks: the case of Kalundborg // Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2011. Vol. 10. P. 79–89. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.01.011.
9. Lombardi D.R., Laybourn P. Redefining industrial symbiosis: crossing academic-practitioner boundaries // Journal of Industrial Ecology. 2012. Vol. 16. Iss. 1. P. 28–37. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00444.x.
10. Deutz P., Lyons D.L., Gibbs D., Jackson T. Industrial ecology and regional development, progress in industrial ecology // International Journal. 2007. Vol. 4. Iss. 3-4. P. 155–163.
11. Walls J.L., Paquin R.L. Organizational perspectives of industrial symbiosis: a review and synthesis // Organization and Environment. 2015. Vol. 28. Iss. 1. P. 32–53. https://doi.org/10.1177/1086026615575333.
12. Golev A., Corder G.D., Giurco D.P. Barriers to industrial symbiosis: insights from the use of a maturity grid // Journal of Industrial Ecology. 2015. Vol. 19. Iss. 1. P. 141–153. https://doi.org/10.1111/jiec.12159.
13. Jensen P.D., Basson L., Hellawell E.E., Bailey M.R., Leach M. Quantifying “geographic proximity”: Experiences from the United Kingdom’s national industrial symbiosis programme // Resources Conservation and Recycling. 2011. Vol. 55. Iss. 7. P. 703–712. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.02.003.
14. Томин Н.В., Шакиров В.А., Курбацкий В.Г., Попова Е.В., Сидоров Д.Н., Козлов А.В. [и др.]. Энергетические сообщества с возобновляемыми источниками энергии: эффективное планирование и управление в условиях многокритериальности. Часть 1 // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. Т. 3. № 78. С. 18–27. EDN: WTRODK.
15 De Graaf F., Goddek S. Smarthoods: aquaponics integrated microgrids // Aquaponics Food Production Systems / eds. S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, G.M. Burnell. Cham: Springer, 2019. P. 321–338. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_15.
16. Homan B., Hoogsteen G., Nebiolo S., Hurink J.L., Smit G.J.M. Maximizing the degree of autarky of a 16 house neighbourhood by locally produced energy and smart control // Sustainable Energy, Grids and Networks. 2019. Vol. 20. P. 100270. https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100270.
17. Muttaqee M., Furqan M., Boudet H. Community response to microgrid development: case studies from the U.S. // Energy Policy. 2023. Vol. 181. P. 113690. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113690.
18. Ceglia F., Marrasso E., Martone C., Pallotta G., Roselli C., Sasso M. Towards the decarbonization of industrial districts through renewable energy communities: techno-economic feasibility of an Italian case study // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 6. P. 2722. https://doi.org/10.3390/en16062722.
19. Adu-Kankam K.O., Camarinha-Matos L.M. Renewable energy communities or ecosystems: an analysis of selected cases // Heliyon. 2022. Vol. 8. Iss. 12. P. e12617. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12617.
20. Yang Weijia, Sparrow S.N., Ashtine M., Wallom D.C.H., Morstyn T. Resilient by design: preventing wildfires and blackouts with microgrids // Applied Energy. 2022. Vol. 313. P. 118793. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118793.
21. Pandyaswargo A.H., Wibowo A.D., Onoda H. Socio-techno-economic assessment to design an appropriate renewable energy system for remote agricultural communities in developing countries // Sustainable Production and Consumption. 2022. Vol. 31. P. 492–511. https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.03.009.
22 Tomin N., Shakirov V., Kurbatsky V., Muzychuk R., Popova E., Sidorov D. et al. A multi-criteria approach to designing and managing a renewable energy community // Renewable Energy. 2022. Vol. 199. P. 1153–1175. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.151.
23. Gjorgievski V.Z., Cundeva S., Georghiou G.E. Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: a review // Renewable Energy. 2021. Vol. 169. P. 1138–1156. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.078.
24. Бык Ф.Л., Васильев В.Г., Карпухин В.А., Мышкина Л.С. Функции региональных сетевых компаний при интеграции локальных энергосистем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 2. С. 48–55. EDN: DQMPRC.
25. Илюшин П.В. Перспективные направления развития распределительных сетей при интеграции локальных интеллектуальных энергосистем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 4. С. 70–80. EDN: JVMAIL.
26. Sepa J. The microgrid case studies: community resilience for natural disasters. 2020. Режим доступа: https://sepapower.org/resource/the-microgrid-case-studies-community-resilience-for-natural-disasters (дата обращения: 18.02.2024).

References

1. Warneryd M., Håkansson M., Karltorp K. Unpacking the complexity of community microgrids: a review of institutions’ roles for development of microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020;121:109690. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109690.

2. Dhabi A. Renewable power generation costs in 2017. *IRENA. International Renewable Energy Agency*. Available from: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA_2017_Power_Costs_2018.pdf [Accessed 17th February 2024].
3. Abolhosseini S., Heshmati A. The main support mechanisms to finance renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2014;40:876-885. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.013. 4. Datsko K.A. Active energy complexes. *Energy policy*. 2020;6:64-75. (In Russ.). https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_6148_64. EDN: KEVGJS.
5. Magnani N., Osti G. Does civil society matter? Challenges and strategies of grassroots initiatives in Italy's energy transition. *Energy Research & Social Science*. 2016;13:148-157. https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.012.
6. Gjorgievski V.Z., Cundeva S., Georghiou G.E. Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: a review. *Renewable Energy*. 2021;169:1138-1156. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.078.
7. Bomberg E., McEwen N. Mobilizing community energy. *Energy Policy.* 2012;51:435-444. https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2012.08.045.
8. Domenech T., Davies M. Structure and morphology of industrial symbiosis networks: the case of Kalundborg. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2011;10:79-89. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.01.011.
9. Lombardi D.R., Laybourn P. Redefining industrial symbiosis: crossing academic-practitioner boundaries. *Journal of Industrial Ecology*. 2012;16(1):28-37. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00444.x.
10. Deutz P., Lyons D.L., Gibbs D., Jackson T. Industrial ecology and regional development, progress in industrial ecology. *International Journal.* 2007;4(3-4):155-163.
11. Walls J.L., Paquin R.L. Organizational perspectives of industrial symbiosis: a review and synthesis. *Organization and Environment.* 2015;28(1):32-53. https://doi.org/10.1177/1086026615575333.
12. Golev A., Corder G.D., Giurco D.P. Barriers to industrial symbiosis: insights from the use of a maturity grid. *Journal of Industrial Ecology*. 2015;19(1):141-153. https://doi.org/10.1111/jiec.12159.
13. Jensen P.D., Basson L., Hellawell E.E., Bailey M.R., Leach M. Quantifying "geographic proximity": Experiences from the United Kingdom's national industrial symbiosis programme. *Resources Conservation and Recycling*. 2011;55(7):703-712. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.02.003.
14. Tomin N.V., Shakirov V.A., Kurbackij V.G., Popova E.V., Sidorov D.N., Kozlov A.V., et al. Renewable energy communities: effective design and management under multicriteria conditions. Part 1. *Electric Power. Transmission and distribution*. 2023;3(78):18-27. (In Russ.). EDN: WTRODK.
15. De Graaf F., Goddek S. Smarthoods: aquaponics integrated microgrids. In: Goddek S., Joyce A., Kotzen B., Burnell G.M. (eds.). *Aquaponics Food Production Systems*. Cham: Springer; 2019, p. 321-338. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_15.
16. Homan B., Hoogsteen G., Nebiolo S., Hurink J.L., Smit G.J.M. Maximizing the degree of autarky of a 16 house neighbourhood by locally produced energy and smart control. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2019;20:100270. https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100270.
17. Muttaqee M., Furqan M., Boudet H. Community response to microgrid development: case studies from the U.S. *Energy Policy*. 2023;181:113690. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113690.
18. Ceglia F., Marrasso E., Martone C., Pallotta G., Roselli C., Sasso M. Towards the decarbonization of industrial districts through renewable energy communities: techno-economic feasibility of an Italian case study. *Energies*. 2023;16(6):2722. https://doi.org/10.3390/en16062722.
19. Adu-Kankam K.O., Camarinha-Matos L.M. Renewable energy communities or ecosystems: an analysis of selected cases. *Heliyon*. 2022;8(12):e12617. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12617.
20. Yang Weijia, Sparrow S.N., Ashtine M., Wallom D.C.H., Morstyn T. Resilient by design: preventing wildfires and blackouts with microgrids. *Applied Energy.* 2022;313:118793. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118793.
21. Pandyaswargo A.H., Wibowo A.D., Onoda H. Socio-techno-economic assessment to design an appropriate renewable energy system for remote agricultural communities in developing countries. *Sustainable Production and Consumption*. 2022;31:492-511. https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.03.009.
22. Tomin N., Shakirov V., Kurbatsky V., Muzychuk R., Popova E., Sidorov D. et al. A multi-criteria approach to designing and managing a renewable energy community. *Renewable Energy*. 2022;199:1153-1175. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.151.
23. Gjorgievski V.Z., Cundeva S., Georghiou G.E. Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: a review. *Renewable Energy*. 2021;169:1138-1156. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.078.
24. Byk F.L., Vasil'ev V.G., Karpuhin V.A., Myshkina L.S. Functions of regional network companies in the integration of local power systems. *Electric Power. Transmission and distribution*. 2020;2:48-55. (In Russ.). EDN: DQMPRC.
25. Ilyushin P.V. Advanced trends of distribution network development when integrating local intelligent power systems. *Electric Power. Transmission and distribution*. 2021;4:70-80. (In Russ.). EDN: JVMAIL.
26. Sepa J. The microgrid case studies: community resilience for natural disasters. 2020. Available from: https://sepapower.org/resource/the-microgrid-case-studies-community-resilience-for-natural-disasters [Accessed 18th February 2024].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Попова Екатерина Валерьевна,
к.т.н.,
старший инженер,
Отдел электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
✉ elen@isem.irk.ru
https://orcid.org/0009-0001-3971-6968

Томин Никита Викторович,
к.т.н.,
заведующий лабораторией управления функционированием электроэнергетических систем №43,
Отдел электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
tomin.nv@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-5898-9649

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ekaterina V. Popova,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Engineer,
Department of Electric Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
✉ elen@isem.irk.ru
https://orcid.org/0009-0001-3971-6968

Nikita V. Tomin,
Cand. Sci. (Eng.),
Head of the LaboratoryHead of the Electric Power System Operation Control Laboratory No. 43,
Department of Electric Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
tomin.nv@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-5898-9649

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 18.04.2024 г.; принята к публикации 20.04.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 18.03.2024; approved after reviewing 18.04.2024; accepted for publication 20.04.2024.

iPolytech Journal 2024. Т. 28. № 2. С. 346-359 ISSN 2782-4004 (print)
2024;28(2):346-359 ISSN 2782-6341 (online)

POWER ENGINEERING

Original article
EDN: LYWSYH
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-346-359

Smart technologies and solutions for future sustainable and resilient energy systems

Vladimir Terzija[1]✉, Lei Ding[2]

[1]*Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech), Moscow, Russia*
[2]*Shandong University, Jinan, China*

Abstract. The main objective of this research is to analyze current problems and methods proposed for solving problems of design, operation and planning for the development of future sustainable electric power systems, taking into account the integration of renewable energy sources, the integration of heat and gas networks using high-speed communication channels. The author's method of ensuring system stability and protecting the integrity of electric power systems is outlined. To ensure stable operation of future electric power systems, it is proposed to use methods of multi-level optimization and control of digital power systems, smart grid technologies and methods for processing vector measurements based on cyber-secure communication channels. It has been established that the proposed schemes make it possible to ensure the stability of the system and protect its integrity. In order to demonstrate the effectiveness of such approaches, an example is given of solving the problem of preventing rolling blackouts of the power system by purposefully separating/isolating the system based on the author's two-stage controlled isolation algorithm. It is shown that to solve the problems of modern electric power industry, it is effective to use new telecommunication technologies, means of ensuring situational awareness and schemes for protecting the integrity of systems based on modern methods of operations research and artificial intelligence. The multicriteria optimization method proposed by the authors uses minimization of the objective function of power flow disruption and takes into account restrictions on the consistency of generator operation. The method was tested on an IEEE test circuit consisting of 118 nodes. Test calculations confirmed that the method allows for minimal power imbalance and minimal disruption of power flows. Thus, the results of the work open up new opportunities for improving the monitoring and protection of future sustainable electricity systems, including taking into account the integration of renewable energy sources, heat and gas networks.

Keywords: digitalization, smart grid, renewable energy sources, converter based generation, blackouts, cascading events

For citation: Terzija V., Ding Lei. Smart technologies and solutions for future sustainable and resilient energy systems. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):346-359. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-346-359. EDN:LYWSYH.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья
УДК 621.31

Умные технологии и решения для будущих устойчивых и надежных энергетических систем

В. Терзия[1]✉, Лэй Динг[2]

[1]*Сколковский институт науки и технологий (Сколтех), Москва, Россия*
[2]*Шаньдунский университет, Цзинань, КНР*

Резюме. Цель исследования – провести анализ актуальных проблем и методов, предлагаемых для решения задач проектирования, эксплуатации и планирования развития будущих устойчивых электроэнергетических систем с учетом интеграции возобновляемых источников энергии, объединения тепловых и газовых сетей с использованием высокоскоростных каналов связи. Излагается авторский метод обеспечения устойчивости системы и защиты целостности электроэнергетических систем. Для обеспечения устойчивой работы будущих электроэнергетических систем предлагается использовать методы многоуровневой оптимизации и управления цифровыми энергосистемами, технологии интеллектуальных сетей и методы обработки векторных измерений на основе кибербезопасных каналов связи. Установлено, что предложенные схемы позволяют обеспечить устойчивость системы и защитить ее целостность. С целью демонстрации эффективности таких подходов приведен пример решения задачи предотвра-

© Terzija V., Ding Lei, 2024

щения веерных отключений энергосистемы путем целенаправленного разделения/изоляции системы на основе авторского двухэтапного алгоритма управляемой изоляции. Показано, что для решения поставленных задач современной электроэнергетики является эффективным использование новых телекоммуникационных технологий, средств обеспечения ситуационной осведомленности и схемы защиты целостности систем, основанных на современных методах исследования операций и искусственного интеллекта. Предложенный авторами метод многокритериальной оптимизации использует минимизацию целевой функции нарушения перетока мощности и учитывает ограничения на согласованность работы генераторов. Метод был протестирован на тестовой схеме IEEE, состоящей из 118 узлов. Тестовые расчеты подтвердили, что метод позволяет обеспечивать минимальный дисбаланс мощности и минимальное нарушение перетоков мощности. Таким образом, результаты работы открывают новые возможности для улучшения мониторинга и защиты будущих устойчивых электроэнергетических систем, в том числе с учетом интеграции возобновляемых источников энергии, тепловых и газовых сетей.

Ключевые слова: цифровизация, смарт-сети, возобновляемые источники энергии, генерация на основе преобразователя, отключения, веерные отключения

Для цитирования: Терзия В., Динг Лэй. Умные технологии и решения для будущих устойчивых и надежных энергетических систем // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 346–359. (In Eng.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-346-359. EDN: LYWSYH.

INTRODUCTION

Massive integration of converter interfaced generation (CIG) and renewable energy sources (RESs) has significantly changed the nature and complexity of modern electrical power systems. This is obvious from Fig. 1, in which different new system components are shown, e.g. wind-farms, solar energy, battery, or electrical vehicles. Practically all components presented are connected to the grid over inverters/power electronics.

Historically, the penetration level of CIG and RES has been permanently increased, what is depicted in Fig. 2, in which the share of different renewable energy generation is depicted [2].

Through integration of CIGs and RESs the system is changing its fundamental properties. These changes can be summarized in a conclusion that the entire system became weak, or at least weaker than the system from the past. Here a definition of a strong system is *the system which stability cannot be significantly affected by different types of perturbations, e.g. sudden topological changes, faults, or loss of* generation. The reasons for the power system to become weaker are power electronics-based system components, particularly generation. For example, Type-3 and Type 4 generators, connected to the grid, do not contribute to the system inertia and fault level [3–5]. From Fig. 3 it can be concluded that only stator of the generator is synchronously connected to the grid, whereas the rotor is decoupled from it through inverters.

System inertia is directly related to the system frequency stability and under the term “inertia” we traditionally understand the rotational inertia, resulting from the rotation of rotors in synchronous generators and different types of ac motors. On the other hand, fault level determines those aspects related to voltage stability. A strong system is a system which

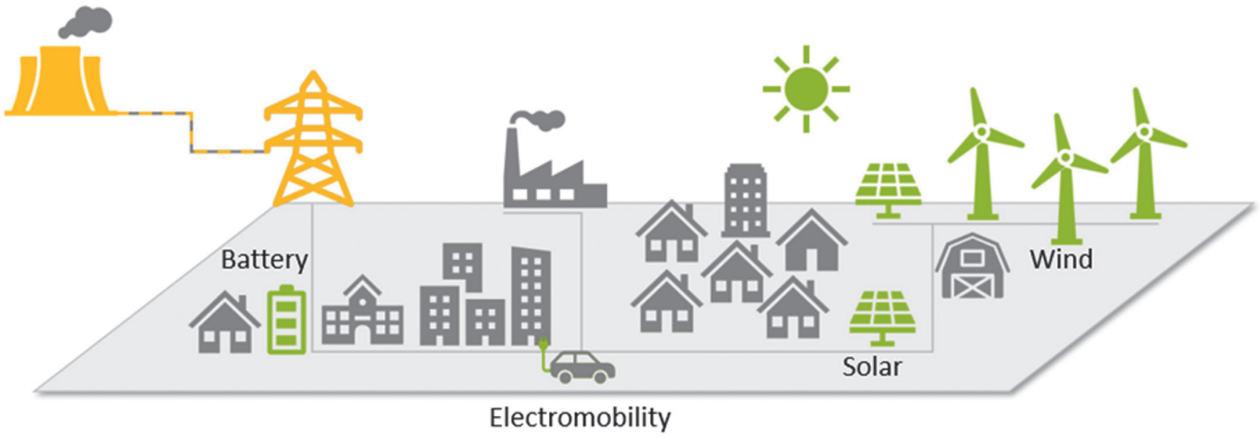


Fig. 1. *Modern electrical power system with CIGs and RESs*
Рис. 1. *Современная система электроснабжения с генерациями с интерфейсом преобразователя (CIG) и возобновляемыми источниками энергии (RES)*

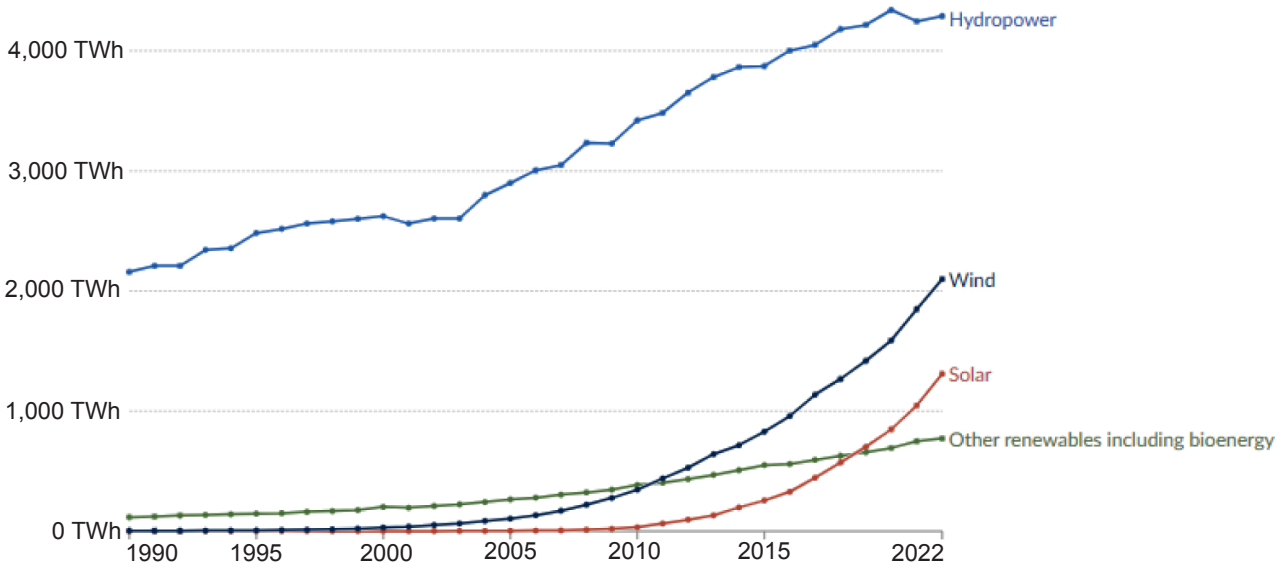


Fig. 2. *Modern renewable energy generation by source [2]*
Рис. 2. *Современная генерация энергии из возобновляемых источников [2]*

is stable, both from frequency and voltage stability perspective. Through connection of CIGs/RESs, the system is becoming weak and vulnerable from the perspective of frequency and voltage stability. In conclusion, system perturbations, e.g. faults, or sudden imbalances of active powers (*P*) caused by e.g. sudden disconnection/connection of generators, can provoke instabilities and start cascading events, which can lead to power system blackouts.

SYSTEM RESILIENCE

Power system resilience is one of the key attributes which modern power systems have to possess and satisfy. Traditionally, the focus was on the system security and reliability. Through integration of different energy systems, e.g. heat, gas, electricity, or hydrogen, the importance of the system flexibility became another important system attribute [6]. In Fig. 4 an example of such an integration is presented.

Resilience is related to low probability, but high impact events, which as such can lead to catastrophic power system blackouts and a number of consequences to the system and the society. The system can be characterized as resilient, if it can successfully go through large scale perturbation and manage to retain its key security and stability, or operational, characteristics. In this context even through the integration of different energy systems into integrated energy system (Fig. 4), the

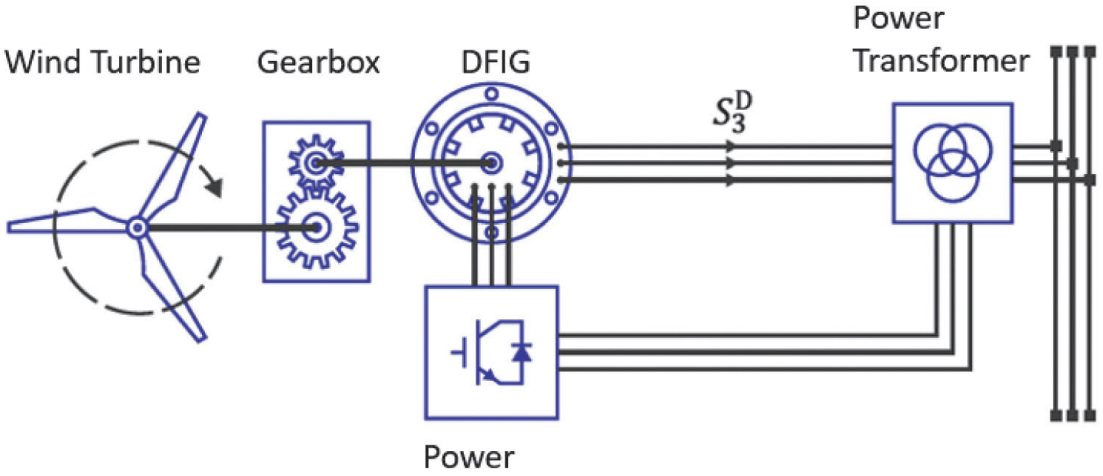


Fig. 3. *Doubly-fed induction generator (DFIG) wind turbine, Type-3 wind generator*
Рис. 3. *Ветряная турбина с асинхронным генератором двойного питания (DFIG), ветрогенератор 3-го типа*

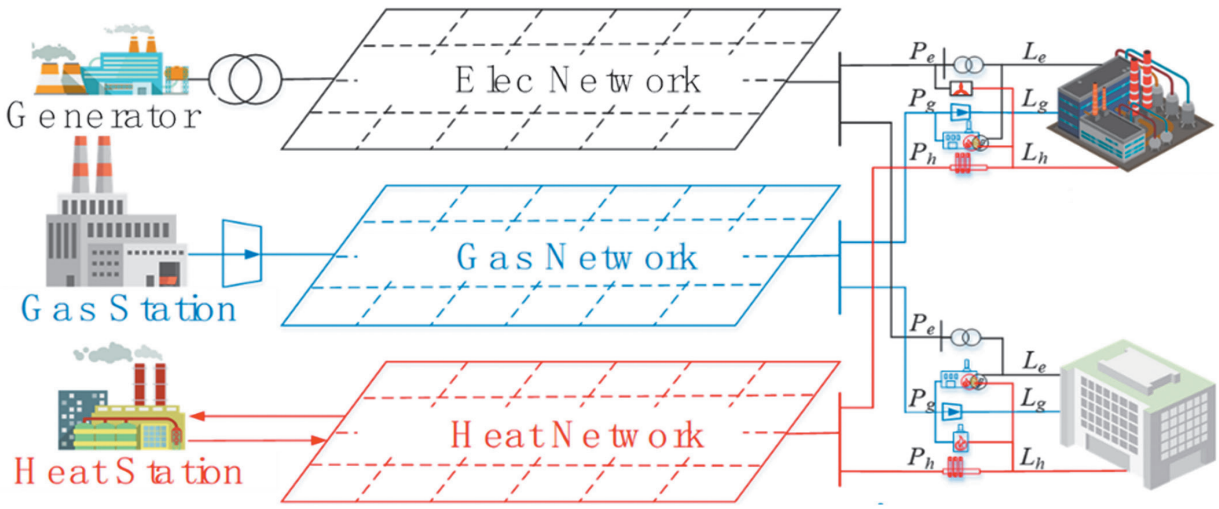


Fig. 4. *Integrated energy systems connected over different types of coupling technologies [6]*
Рис. 4. *Интегрированные энергетические системы, соединенные с помощью различных типов технологий сопряжения [6]*

system resilience can be further improved. According to [7], power system resilience is defined as "the system ability to withstand and reduce the magnitude and/or duration of disruptive events, which includes the capability to anticipate, absorb, adapt to, and/or rapidly recover from such an event". The term disruptive events refers to high impact and low probability unexpected perturbation, including extreme natural disasters, or man-made attacks. Typical examples are snow storms, or cyber-attacks [8, 9].

The system resilience can be improved through short-, mid- and long-term planning. Different types of investing strategies can bust the system resilience. This has to do with e.g. planning actions 20 years ahead. However, the system resilience can be also monitored in real-time, subject to the accepted resilience definition and metrics. Finally, the system resilience can be significantly improved through adequate monitoring, protection and control actions.

Large perturbations, e.g. simultaneous outage of a large number of system components, resulting from natural disasters and extreme weather conditions, traditionally cause so called cascading events, i.e. sequential/parallel outage/loss of the system components, e.g. transmission lines, power transformers, generators, or demand. By assessing the resilience level in the grid, it can be concluded how critical the system "resilience state" is. This is addressed in Fig. 5, in which the resilience level in a power system, connected to other energy systems, e.g. gas, heat, or hydrogen, is presented. The resilience trapezoids [10] changed over the time is used to quantify the resilience level.

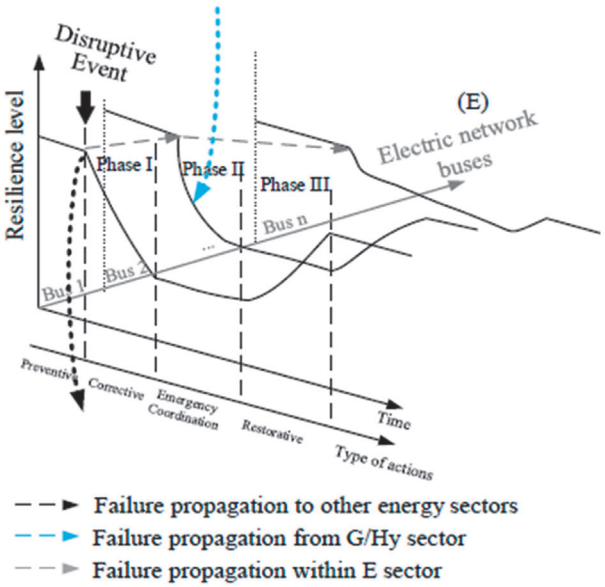


Fig. 5. *Resilience level changed of time in a power system connected to other energy systems/sectors [10]*
Рис. 5. *Изменение уровня устойчивости с течением времени в энергосистеме, подключенной к другим энергосистемам/секторам [10]*

DIGITALIZATION AND DIGITAL SUBSTATION

The quality of the system monitoring, protection and control significantly relies on data obtained, on their quality and quantity, as well as speed how quickly data are collected from the physical process observed. Smart grid technology is accelerating the speed of the digitalization of the modern electrical power systems. Novel sensors, like time synchronized

Phasor Measurement Units (PMUs), or high speed and cyber secure communication channels are strongly supporting advanced monitoring, protection and control schemes. Here the quality of data, but also cyber security is critically important for the success of new protection and control schemes. In Fig. 6, a digital substation (right), presented next to the classical substation (left), is given [11]. Digital substation has non-conventional instrument transformers, precise conversion from analogue to digital voltages and currents, fibre-optic communication infrastructure having no problems with electromagnetic compatibility, fast data transfer to higher hierarchical levels and enables new protection solutions, both at the unit and system level (System Integrity Protection Schemes – SIPS), e.g. prevention of power system blackouts, as presented in the rest of the paper. It can be observed that the information from switchgear is transferred of the relay and substation control rooms to the central grid control room, in which the Energy Management System (EMS) is located. At this level, e.g. the system state is estimated.

Reliable information about the system state, which can be also linked to the entire situational awareness request, is a prerequisite for optimal operation of the entire power system, which is traditionally related to a series of actions undertaken under the umbrella of the EMS. In Fig. 7, major building blocks, creating a closed loop monitoring, protection and control based on different sources of input data, is presented [12, 13]. Here time-synchronized PMU data are integrated with other data obtained over traditional SCADA and those data forecasted, or obtained in any other way over EMS. Properly managed database is now a source from which key situational awareness attributes can be extracted, for example security margins, the level of the system flexibility, or resilience. From the perspective of advanced protection and control applications, the system state, information about load dynamics, system inertia, fault level, etc. can contribute to the quality of the SIPS actions and mitigating measures necessary for detecting cascading events and preventing power system blackouts.

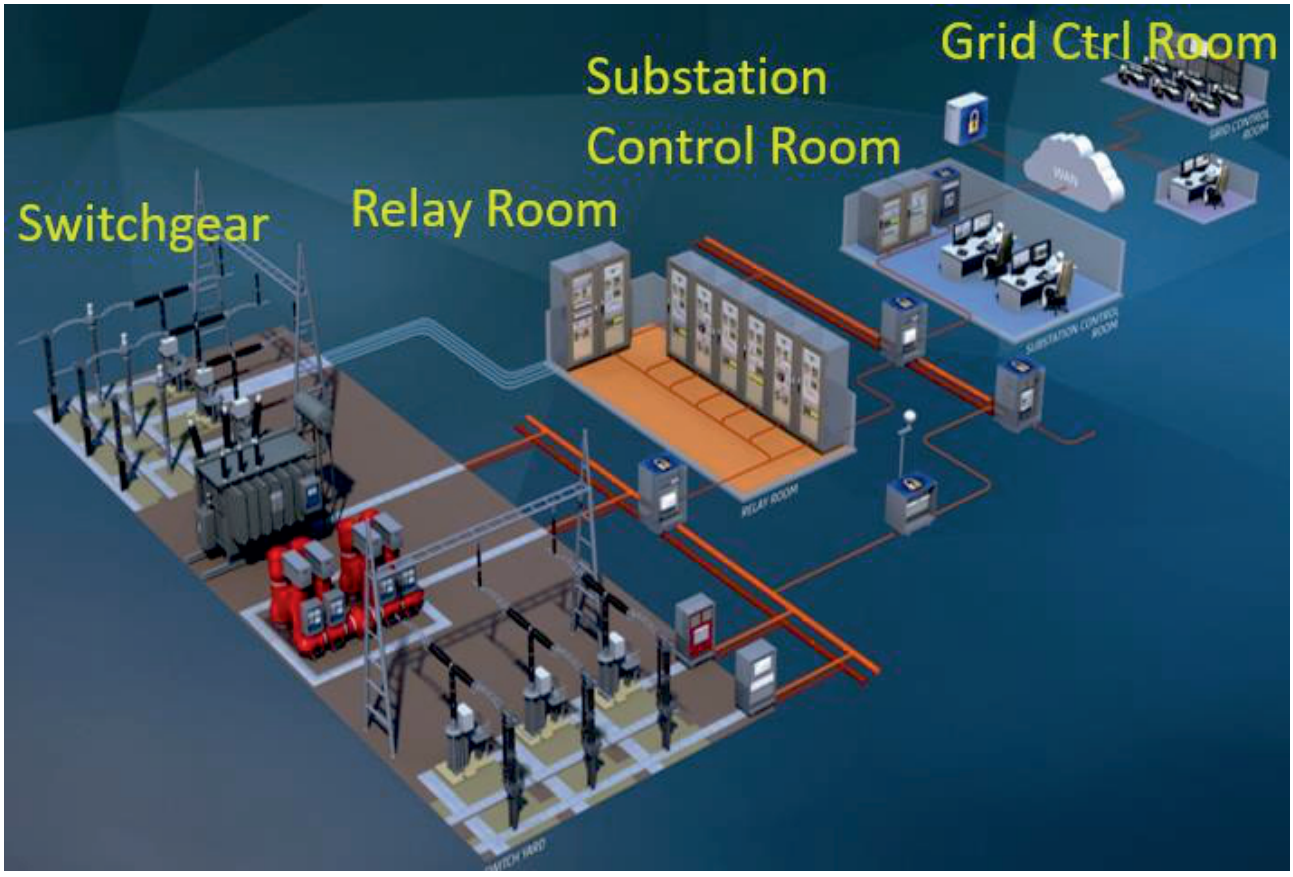


Fig. 6. *Digital substation (switchgear) [11]*
Рис. 6. *Цифровая подстанция (распределительное устройство) [11]*

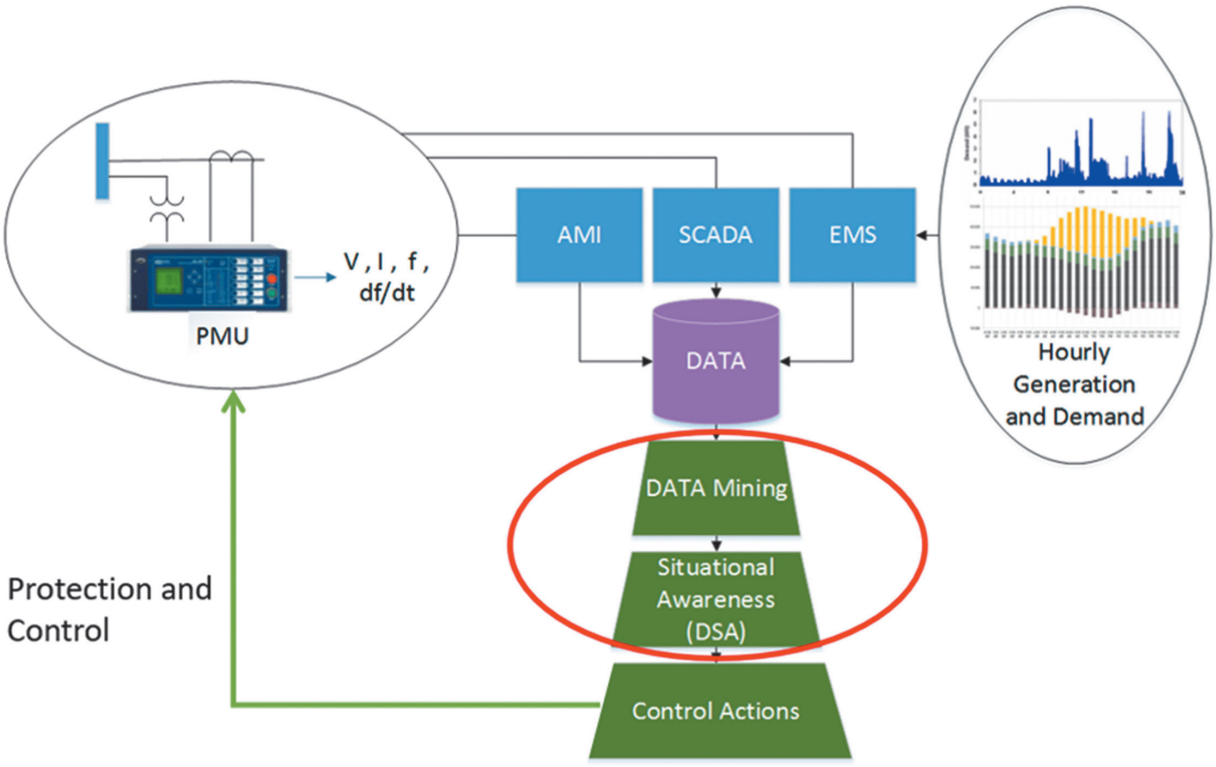


Fig. 7. *Building blocks, creating a closed loop power system monitoring, protection and control*
Рис. 7. *Строительные блоки, создающие замкнутый контур мониторинга, защиты и управления энергосистемой*

The example how PMUs can support advanced situational awareness, i.e. power system state estimation, are new installations worldwide, e.g. in the UK. In Fig. 8, PMUs are collecting real-time data from different locations of the grid. Data are collected at different locations (Data Concentrators - DC) and centrally stored at the Super Data Concentrator (Super DC). Such a hierarchical structure can enable fast state estimation, or protection and control functions which were impossible to be realized without such a smart grid technology supporting the overall system digitalization. Using PMUs and fast communication channels, the system state can be obtained within 0.1-1 s, whereas the traditional, purely SCADA-based estimator, required more than 5-10 min to accomplish the state estimation procedure.

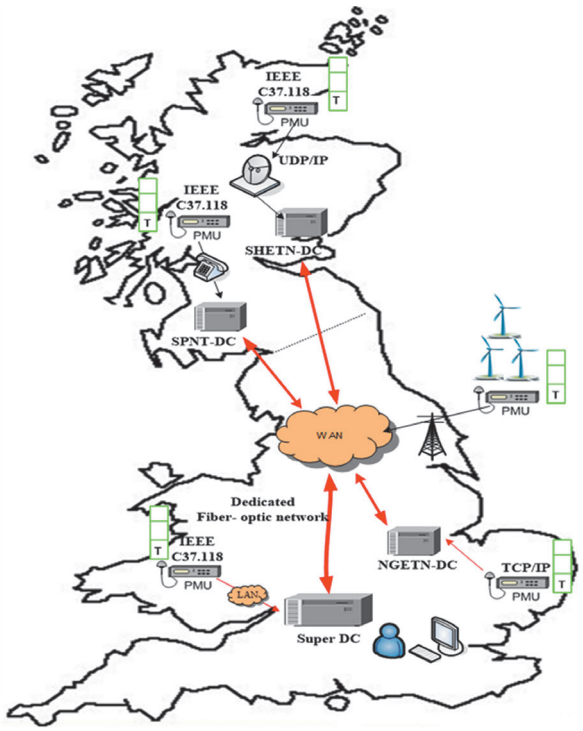


Fig. 8. *Integration of PMUs for advanced monitoring, protection and control of power systems with CIGs and RESs*
Рис. 8. *Интеграция устройств синхронизированных векторных измерений (PMU) для расширенного мониторинга, защиты и управления энергосистемами с генерациями с интерфейсом преобразователя (CIG) и возобновляемыми источниками энергии (RES)*

SYSTEM INTEGRITY PROTECTION SCHEMES

The role of power system protection is a) to protect individual system components – unit protection, or b) to protect the entire power system – System Integrity Protection Schemes (SIPS). SIPS is defined as an automatic protection system designed to identify abnormal system conditions and

to perform predictive or remedial actions necessary for maintaining system integrity. In the past, conventional protection devices were designed to protect individual elements of equipment from being damaged during faults by quickly detecting overcurrent conditions, or other dangerous operating conditions, and then selectively and quickly isolating the faulty equipment from the system. In contrast, SIPS are designed to maintain the integrity of the entire power system by simultaneously monitoring and controlling multiple elements of the system. It integrates and analyses both local and system level information against wide area contingencies. This approach allows SIPS to improve the efficiency and security of system operation under specific conditions. SIPS encompass few different levels or schemes: Special Protection Schemes (SPS), Remedial Action Schemes (RAS), as well as additional schemes such as, underfrequency, undervoltage, out-of-step, etc. It is commonly believed that modern SIPS are derived from the coordination of different levels of local protection schemes.

Both unit protection and SIPSs can prevent negative development of cascading events and support the system integrity. In Fig. 9 a block diagram of a typical SIPS is presented. The following three key SIPS stages can be observed: a) disturbance identification, which must be secure and robust, b) decision making, which must be reliable and fast enough and c) action, which has to be reliably forwarded back to the system.

The quality of SIPS input data is critically important for its efficacy. Modern SIPSs rely on wide-area measurements and availability of novel sensor and ICT technology. Phasor Measurement Units (PMUs) and fast and cyber secure communication infrastructure are the backbone of modern Wide Area Monitoring, Protection and Control (WAMPAC) systems [14]. Nowadays they are enablers of modern SIPSs. Intentional controlled islanding of a power system is an efficient SIPS for preventing power system blackouts caused by large system disturbances. This kind of SIPSs limits the occurrence and consequences of blackouts by splitting the power system into a group of smaller, islanded power systems, called islands. The essence of an islanding solution is in determining a suitable set of transmission lines that must be disconnected to create a set of electrically isolated/independent islands. This paper describes an algorithm for determining suitable islanding solutions.

The prerequisite for a successful system islanding is selection of lines/cables which must be opened to create independent islands. It is necessary to create stable islands and in this context the instant at which the islanding is undertaken plays an important role for preventing blackouts.

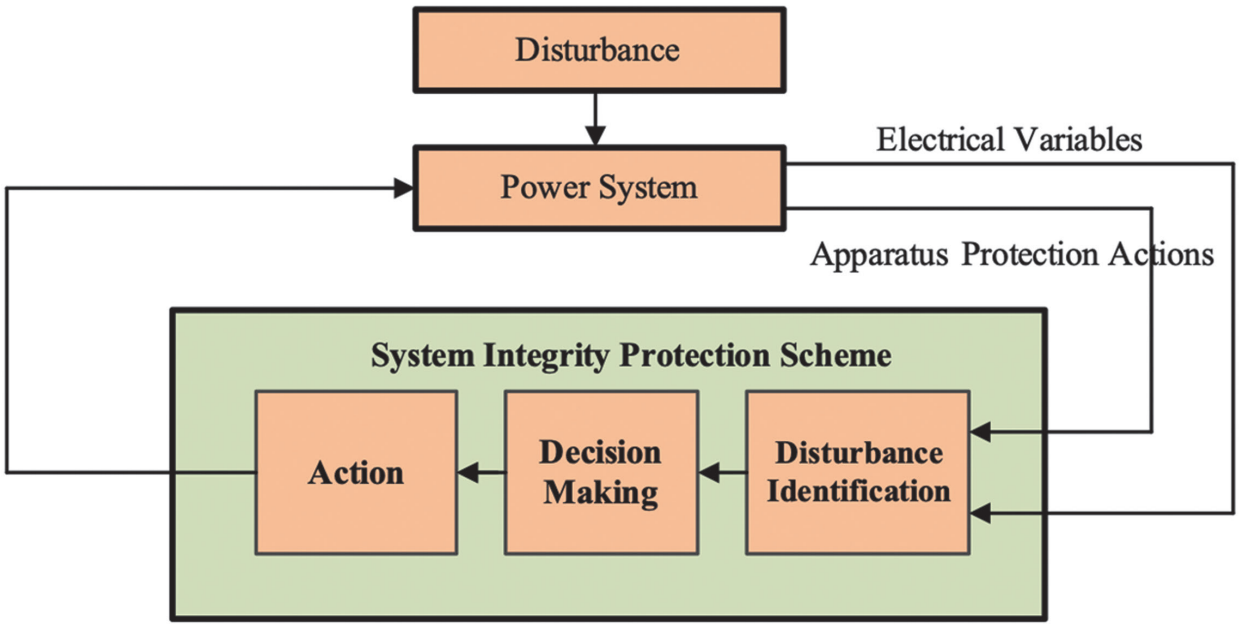


Fig. 9. *Block diagram of a typical SIPS*
Рис. 9. *Структурная схема типичной схемы защиты целостности системы (SIPS)*

However, the schemes for prevention of power system blackouts rely on the quality of input data, as well as the system monitoring, which is traditionally linked to the issue of power system state estimation. Modern system estimation algorithms rely on PMUs integrated into the existing SCADA system (hybrid state estimator), or on PMUs only (PMU-based linear state estimator).

FUNDAMENTALS OF INTENTIONAL CONTROL ISLANDING

To create stable islands, the islanding solution must satisfy a large number of constraints, such as load-generation balance, generator coherency, availability of transmission lines and their thermal limits, voltage stability, transient stability, etc. It would be far too complicated to search for a solution satisfying all these constraints. In extreme cases it is likely that such a solution even does not exist. Considering only a sub-set of these constraints, e.g. a) load-generation active power balance and b) generator coherency, a set of feasible candidate islanding solutions could be created. This set of candidates can be coordinated with other corrective measures to find the final islanding solution that satisfies all possible constraints [15].

The existing islanding methods can be classified according to the objective function used for decision making, i.e. creation of the islanding solution. Two main types of objective functions are used here:

a) minimal power imbalance and

b) minimal power-flow disruption.

Methodologies for minimal power imbalance minimize the power imbalance within the islands formed to reduce the amount of load that must be shed after the system splitting.

Methodologies for finding islanding solutions based on the minimal power-flow disruption minimize the change of the power flow pattern within the system following the system splitting.

The difference between power imbalance and power-flow disruption is that the power imbalance can be expressed by the algebraic sum of active power (considering the direction of power flow) on each disconnected transmission line, while the power-flow disruption can be expressed by the arithmetical sum of active power on each disconnected transmission line. Finding a solution with the minimal power imbalance belongs to a class of the so-called *np*-hard problems which are computationally exceptionally demanding. This is the reason for designing new approaches which are practical and particularly capable of coping with large power networks and a requirement for the real-time decision making. Most of existing algorithms overcome this challenge by using heuristic search methods, or by solving the problem by creating small dimension network equivalents of the original large size network. Heuristic search methods are usually quite flexible and have satisfactory computational efficiency. However, the solution quality cannot be guaranteed since these methods tend to converge to local, rather than global, solutions. Consequently, the islanding solution might be not effective enough.

In the Section below, the two-step Spectral Clustering Controlled Islanding algorithm (the SCCI algorithm) will be presented and used to demonstrate its efficacy [16]. In the first step of the SCCI algorithm, the generator nodes are grouped using normalized spectral clustering. The results of this grouping serve as pair-wise constraints in the next step of the SCCI algorithm, in which every node is grouped based on constrained spectral clustering. This constrained spectral clustering uses power flow data to producing an islanding solution with minimal power-flow disruption. Therefore, the two-step SCCI algorithm proposed here can identify, in real time, an islanding solution that has minimal power-flow disruption and satisfies the constraint of generator coherency.

CONTROLLED ISLANDING PROBLEM

The problem of finding coherent generator groups is equivalent to an optimization problem of finding the weakest dynamic coupling between different generator groups, as shown in (1) below [16].

$$\min S = \min_{V_{G1}, V_{G2} \subset V_G} \left(\sum_{j \in V_{G2}} \sum_{i \in V_{G1}} \left(\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} \cdot \left(\frac{1}{H_i} + \frac{1}{H_j} \right) \right) \right). \quad (1)$$

Minimal power imbalance and minimal power-flow disruption, defined according to (2) and (3) respectively, can both be used as objective functions of controlled islanding. Each objective will produce a different solution with different advantages and disadvantages.

$$\min_{V_1,V_2\subset V}\left(\left|\sum_{i\in V_1,j\in V_2}P_{ij}\right|\right); \quad (2)$$

$$\min_{V_1,V_2\subset V}\left(\sum_{i\in V_1,j\in V_2}\left|P_{ij}\right|\right), \quad (3)$$

where P_{ij} denotes the value of the active power on the transmission line between node *i* and *j*.

The controlled islanding problem that is solved in this paper consists of the minimal power-flow disruption objective function (3) and the generator coherency constraint (1). These two optimization problems are combined together to form the final SCCI algorithm expressed through (4). This is done by firstly solving (1), to find the set of coherent generator groups, and secondly by solving (2) subject to these generator groups [11].

$$\left[\mathbf{V}_{G1}^{*},\mathbf{V}_{G2}^{*}\right]=\arg\min_{V_{G1},V_{G2}\subset V_G}\left(\sum_{j\in V_{G2}}\sum_{i\in V_{G1}}\left(\frac{\partial P_{ij}}{\partial\delta_{ij}}\cdot\left(\frac{1}{H_i}+\frac{1}{H_j}\right)\right)\right); \quad (4)$$

$\min_{V_1,V_2\subset V}\left(\sum_{i\in V_1,j\in V_2}\left|P_{ij}\right|\right)$ subject to $\mathbf{V}_{G1}^{*}\subset\mathbf{V}_1,\mathbf{V}_{G2}^{*}\subset\mathbf{V}_2$.

Here, *argmin* stands for the *argument of the minimum*, i.e. $\left[\mathbf{V}_{G1}^{*},\mathbf{V}_{G2}^{*}\right]$ is the node grouping that minimizes the objective function of (1). Spectral clustering is the tool used in this paper to solve the islanding problem. In the next Section the two-step spectral clustering controlled islanding algorithm will be presented.

The two-step Spectral Clustering Controlled Islanding (**SCCI**) algorithm can solve the optimization problem expressed in (4). Its solution is equivalent to determining a suitable islanding solution.

This solution can be found by constructing two graphs, based on the objective function and constraint from (4), and applying the **SCCI** algorithm to find the minimum cut of these two graphs.

In the *first step* of the **SCCI** algorithm, the dynamic graph $\mathbf{G}_D$ is constructed. It only contains the generator nodes and its edge weights of this graph are the synchronizing coefficients $\partial P_{ij}/\partial\delta_{ij}$ that describe the dynamic coupling between the nodes *i* and *j*. To satisfy the generator coherency constraint (1) the generator nodes are grouped using the *normalized spectral clustering* algorithm. These groups of generator nodes then serve as constraints for the second step of the **SCCI** algorithm.

In the *second step* of the algorithm, the static graph $\mathbf{G}_D$ is constructed using power flow data. It contains every node and the edge weights are defined as the absolute value of the active power exchange between nodes *i* and *j*, $\left|P_{ij}\right|$.ускакало вверх The nodes are then grouped using *constrained spectral clustering*, which will be described in this Section, to solve the optimization problem described in (4).

In Fig. 10 a flowchart depicting the execution of the **SCCI** algorithm is presented [16].

Obviously, a prerequisite for a successful algorithm execution is the information about the system state. This can be achieved by using PMU-based linear state estimators, which can be executed practically in real-time. For this purpose, approximately 30% of nodes of the transmission grid should be covered by PMUs.

To demonstrate the advantages and efficacy of the proposed SCCI algorithm, the IEEE 118-bus test system was used.

After executing the first algorithm step, the following three coherent groups of generators are obtained (see Table).

After executing the second algorithm step, the splitting solution presented in Fig. 11 was obtained. The two cutsets produced in the second step of the **SCCI** algorithm, separated Group 1 from Groups 2 and 3, and then separated Group 2 from Group 3, respectively. Combined, these two cutsets form the final islanding solution marked in Fig. 11.

As it was shown in [16], this method outperforms other methods aimed to be applied for controlled islanding. The method relies on understanding the system state and fast communication infrastructure needed to send centralized commands from the ESM to circuit breakers through which the islanding is happening.

The above islanding scheme is obviously quite advanced and it can be also extended to

Generator groups for the assessed IEEE 118-bus test system
Группы генераторов для оцениваемой 118-шинной тестовой системы IEEE

Group 1	Group 2	Group 3
10, 12, 25, 26, 31	46, 49, 54, 59, 61, 65, 66, 69, 80	87, 89, 100, 103, 111

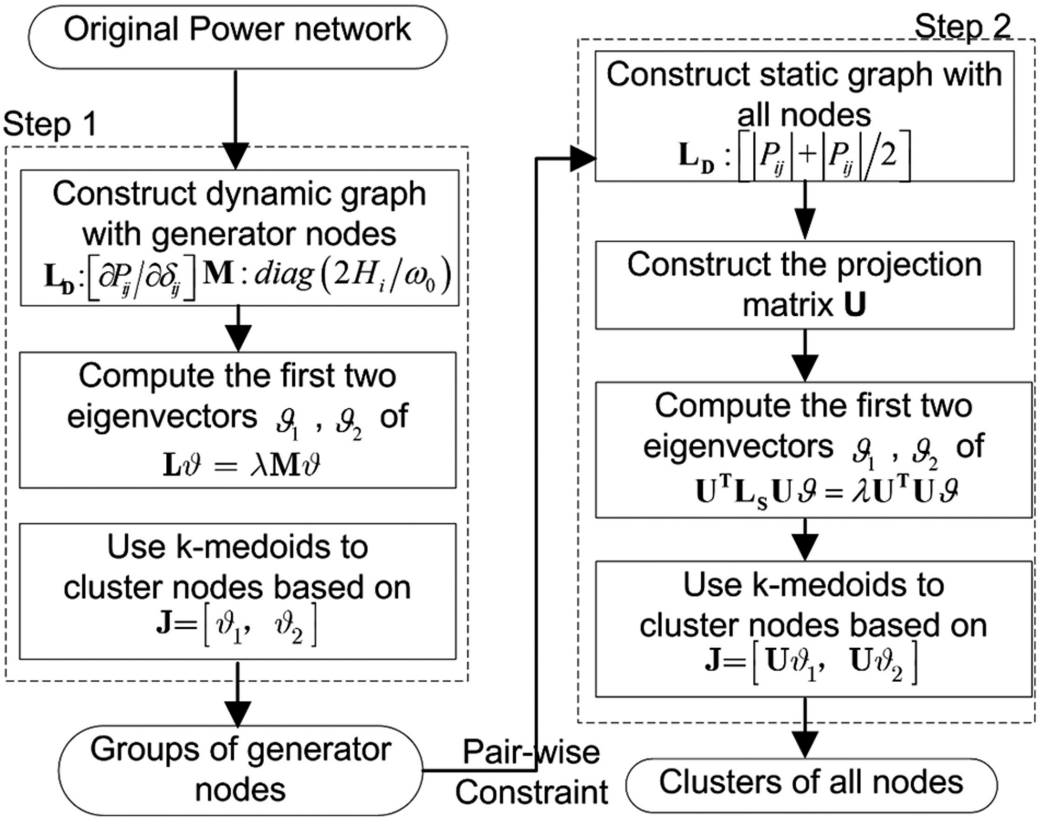


Fig. 10. *Flowchart of the* ***SCCI*** *algorithm [16]*
Рис. 10. *Блок-схема алгоритма SCCI [16]*

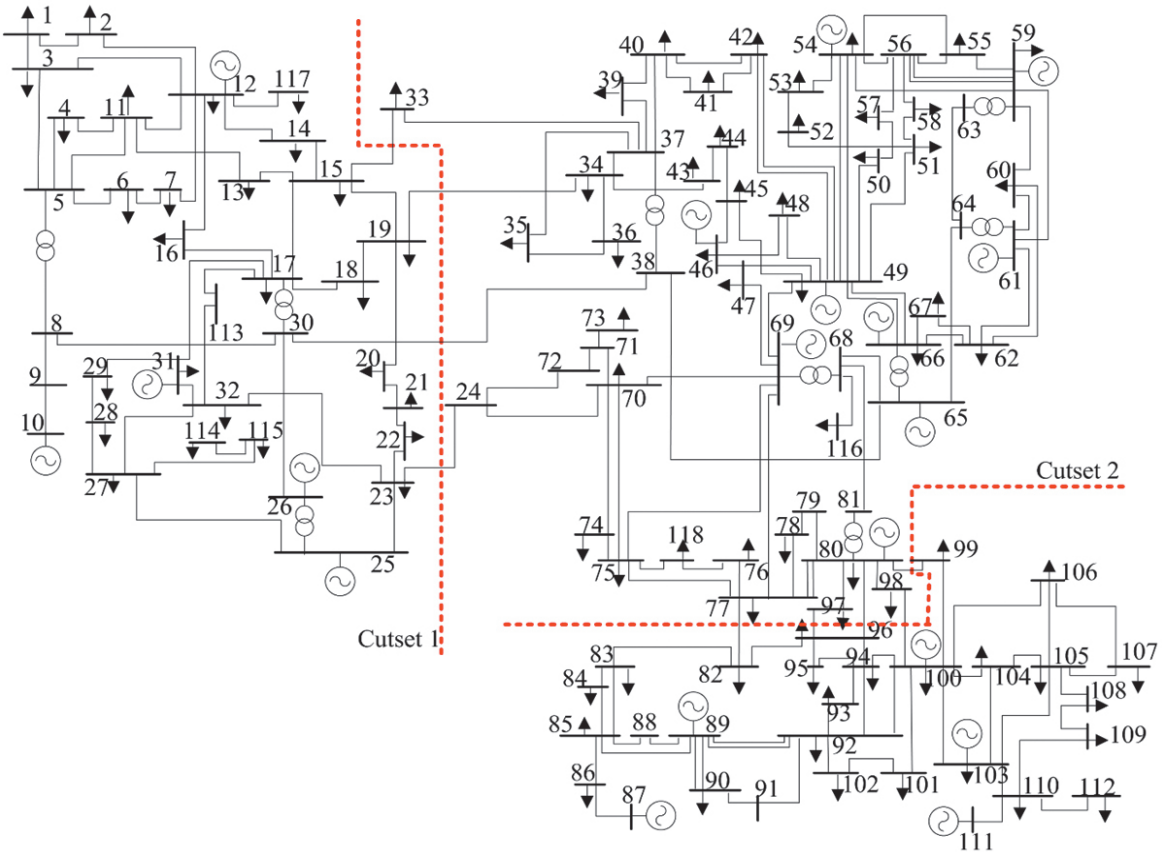


Fig. 11. *Single-line diagram of the IEEE 118-bus test network and the islanding solution [16]*
Рис. 11. *Однолинейная схема 118-шинной тестовой сети IEEE и изолированного решения [16]*

approaches focused on voltage stability. Fir, this purpose, real-time information about reactive powers in the grid would be critical [17]. On the other hand, information about the power flow in the grid with e.g. electric vehicles can be equally important to be known [18]. From the perspective of the understanding of the grid parameters measurement-based transmission line parameter estimation methods (e.g. [19]) can improve the confidence in the system data and consequently protection and control schemes supporting the system resilience.

The proposed control and protection schemes must be properly tested using e.g. hardware in the loop testing facilities [20]. Furthermore, the presented islanding methodology should also involve the assessment of the instant/moment when the islanding should occur, i.e. be applied. A research on this topic is addressed in [21]. Next, the islanding has to be effective in low inertia power systems, in which the quality of the system dynamics is different and application of islanding schemes even more challenging [22]. Last but not least, since the entire scheme relies on real-time data from the grid and commands to circuit breakers responsible for network splitting are sent over communication infrastructure (ICT), the security of this infrastructure must be extremely high and immune to potential cyber-attacks.

CONCLUSION

The paper discusses the challenges with future power networks in which the penetration level of converter interfaced generation and renewable energy sources is permanently increased, so that networks are becoming weak and prone to different types of instabilities. Digitalization and advanced technologies, based on novel sensor and communication infrastructure can support solutions for prevention of cascading events and power system blackouts. Discussing structure of typical SIPSs, it was concluded that modern situational awareness tools, integrated into modern EMSs can enable next generation of SIPSs, capable of preventing power system blackouts. The paper also describes a novel two-step Spectral Clustering Controlled Islanding Algorithm, for determining islanding solutions for power systems. At the core of this algorithm is a single optimization problem that uses the minimal power-flow disruption as objective function and considers ensuring generator coherency as a constraint. A more secure communication infrastructure (ICT) will enable practical solutions leading to advanced Wide Area Protection solutions. These will support even higher deployment of renewable energy sources and clean energy targets.

References

1. Marvin A. Konzeptionierung und erprobung von dezentralen frequenzhaltungsmaßnahmen und leistungsflussorientierten lastabwurfverfahren im verteilnetz. *Eldorado - Repositorium der TU Dortmund*. 2021. http://doi.org/10.17877/DE290R-22255.
2. Bendong T., Zhao Junbo, Netto M., Krishnan V., Terzija V., Zhang Yingchen. Power system inertia estimation: Review of methods and the impacts of converter-interfaced generations. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.* 2022;134:107362. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107362.
3. Ritchie H., Roser M., Rosado P. Renewable energy sources are growing quickly and will play a vital role in tackling climate change. *Renewable Energy*. Available from: https://ourworldindata.org/renewable-energy [Accessed 29th September 2023].
4. Zhao Junbo, Tang Yi, Terzija V. Robust online estimation of power system center of inertia frequency. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018;34(1):821-825. http://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2879782.
5. Sun M., Feng Y., Wall P., Azizi S., Yu J., Terzija V. On-line power system inertia calculation using wide area measurements. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019;109:325-331. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.02.013.
6. Taylor P.C., Abeysekera M., Bian Y., Ćetenović D., Deakin M., Ehsan A., et al. An interdisciplinary research perspective on the future of multi-vector energy networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.* 2022;135:107492. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107492.
7. Stankovic A. The definition and quantification of resilience. *IEEE PES. Power & Energy Society*. 2018. Available from: https://grouper.ieee.org/groups/transformers/subcommittees/distr/C57.167/F18-Definition&QuantificationOfResilience.pdf [Accessed 29th September 2023].
8. Panteli M., Mancarella P. The grid: stronger, bigger, smarter?: presenting a conceptual framework of power system resilience. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2015;13(3):58-66. https://doi.org/10.1109/MPE.2015.2397334.
9. Bie Zhaohong, Lin Yanling, Li Gengfeng, Li Furong. Battling the extreme: a study on the power system resilience. *Proceedings of the IEEE*. 2017;105(7):1253-1266. https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2679040.

10. Wang Jiawei, Pinson P., Chatzivasileiadis S., Panteli M., Strbac G., Terzija V. On machine learning-based techniques for future sustainable and resilient energy systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2022;14(2):1230-1243. https://doi.org/10.1109/TSTE.2022.3194728.
11. Mohapatra P. Fitness project final report, network innovation and competition scheme, Ofgem. *Future Intelligent Transmission NEtwork SubStation*. 2015. Available from: https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/fitness_submission.pdf [Accessed 30th September 2023].
12. Clark S., Wilson D., Al-Ashwal N., Macleod F., Mohapatra P., Yu James, et al. Addressing emerging network management needs with enhanced WAMS in the GB VISOR project. In: *Power Systems Computation Conference*. 2016. https://doi.org/10.1109/PSCC.2016.7540948.
13. Wall P., Shams N., Terzija V., Hamidi V., Grant C., Wilson D., et al. Smart frequency control for the future GB power system. In: *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*. 2016. https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2016.7856265.
14. Terzija V., Valverde G., Cai D., Regulski P., Madani V. Fitch Jo., et al. Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks. In: *Proceedings of the IEEE*. 2010;99(1):80-93. https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2060450.
15. Terzija V. Adaptive underfrequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2006;21(3):1260-1266. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.879315.
16. Ding Lei, Gonzalez-Longatt F.M., Wall P., Terzija V. Two-step spectral clustering controlled islanding algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2013;28(1):75-84. https://doi.org/10.1109/tpwrs.2012.2197640.
17. Dragosavac Ja., Janda Z., Milanovic Jo.V., Arnautovic D., Radojicic B. On-line estimation of available generator reactive power for network voltage support. In: *8th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*. 2012. https://doi.org/10.1049/cp.2012.2014.
18. Azizipanah-Abarghooee R., Terzija V., Golestaneh F., Roosta A. Multiobjective dynamic optimal power flow considering fuzzy-based smart utilization of mobile electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2016;12(2):503-514. https://doi.org/10.1109/TII.2016.2518484.
19. Li Changgang, Zhang Yaping, Zhang Hengxu, Wu Qiuwei, Terzija V. Measurement-based transmission line parameter estimation with adaptive data selection scheme. *IEEE Transactions on Smart Grid.* 2017;9(6):5764-5773. https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2696619.
20. Shair Ja., Xie Xiaorong, Li Yunhong, Terzija V. Hardware-in-the-loop and field validation of a rotor-side subsynchronous damping controller for a series compensated DFIG system. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020;36(2):698-709. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.2989475.
21. Ding Lei, Guo Yichen, Wall P., Sun Kai, Terzija V. Identifying the timing of controlled islanding using a controlling UEP based method. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018;33(6):5913-5922. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2842709.
22. Ding Lei, Ma Zhenbin, Wall P., Terzija V. Graph spectra based controlled islanding for low inertia power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2016;32(1):302-309. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2582519.

Список источников

1. Marvin A. Konzeptionierung und erprobung von dezentralen frequenzhaltungsmaßnahmen und leistungsflussorientierten lastabwurfverfahren im verteilnetz // Eldorado - Repositorium der TU Dortmund. 2021. http://doi.org/10.17877/DE290R-22255.
2. Bendong T., Zhao Junbo, Netto M., Krishnan V., Terzija V., Zhang Yingchen. Power system inertia estimation: Review of methods and the impacts of converter-interfaced generations // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2022. Vol. 134. P. 107362. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107362.
3. Ritchie H., Roser M., Rosado P. Renewable energy sources are growing quickly and will play a vital role in tackling climate change // Renewable Energy. Режим доступа: https://ourworldindata.org/renewable-energy (дата обращее ния: 29.09.2023).
4. Zhao Junbo, Tang Yi, Terzija V. Robust online estimation of power system center of inertia frequency // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 34. Iss. 1. 821–825. http://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2879782.
5. Sun M., Feng Y., Wall P., Azizi S., Yu J., Terzija V. On-line power system inertia calculation using wide area measurements // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. Vol. 109. P. 325–331. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.02.013.
6. Taylor P.C., Abeysekera M., Bian Y., Ćetenović D., Deakin M., Ehsan A., et al. An interdisciplinary research perspective on the future of multi-vector energy networks // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2022. Vol. 135. P. 107492. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107492.
7. Stankovic A. The definition and quantification of resilience // IEEE PES. Power & Energy Society. 2018. Режим доступа: https://grouper.ieee.org/groups/transformers/subcommittees/distr/C57.167/F18-Definition&QuantificationOfResilience.pdf (дата обращения: 29.09.2023).
8. Panteli M., Mancarella P. The grid: stronger, bigger, smarter?: presenting a conceptual framework of power system resilience // IEEE Power and Energy Magazine. 2015. Vol. 13. Iss. 3. P. 58–66. https://doi.org/10.1109/MPE.2015.2397334.

9. Bie Zhaohong, Lin Yanling, Li Gengfeng, Li Furong. Battling the extreme: a study on the power system resilience // Proceedings of the IEEE. 2017. Vol. 105. Iss. 7. P. 1253–1266. https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2679040.
10. Wang Jiawei, Pinson P., Chatzivasileiadis S., Panteli M., Strbac G., Terzija V. On machine learning-based techniques for future sustainable and resilient energy systems // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2022. Vol. 14. Iss. 2. P. 1230–1243. https://doi.org/10.1109/TSTE.2022.3194728.
11. Mohapatra P. Fitness project final report, network innovation and competition scheme, Ofgem // Future Intelligent Transmission NEtwork SubStation. 2015. Режим доступа: https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/fitness_submission.pdf (дата обращения: 30.09.2023).
12. Clark S., Wilson D., Al-Ashwal N., Macleod F., Mohapatra P., Yu James, et al. Addressing emerging network management needs with enhanced WAMS in the GB VISOR project // Power Systems Computation Conference. 2016. https://doi.org/10.1109/PSCC.2016.7540948.
13. Wall P., Shams N., Terzija V., Hamidi V., Grant C., Wilson D., et al. Smart frequency control for the future GB power system // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. 2016. https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2016.7856265.
14. Terzija V., Valverde G., Cai D., Regulski P., Madani V. Fitch Jo., et al. Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks // Proceedings of the IEEE. 2010. Vol. 99. Iss. 1. P. 80–93. https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2060450.
15. Terzija V. Adaptive underfrequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation // IEEE Transactions on Power Systems. 2006. Vol. 21. Iss. 3. P. 1260–1266. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.879315.
16. Ding Lei, Gonzalez-Longatt F.M., Wall P., Terzija V. Two-step spectral clustering controlled islanding algorithm // IEEE Transactions on Power Systems. 2013. Vol. 28. Iss. 1. P. 75–84. https://doi.org/10.1109/tpwrs.2012.2197640.
17. Dragosavac Ja., Janda Z., Milanovic Jo.V., Arnautovic D., Radojicic B. On-line estimation of available generator reactive power for network voltage support // 8th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion. 2012. https://doi.org/10.1049/cp.2012.2014.
18. Azizipanah-Abarghooee R., Terzija V., Golestaneh F., Roosta A. Multiobjective dynamic optimal power flow considering fuzzy-based smart utilization of mobile electric vehicles // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2016. Vol. 12. Iss. 2. P. 503–514. https://doi.org/10.1109/TII.2016.2518484.
19. Li Changgang, Zhang Yaping, Zhang Hengxu, Wu Qiuwei, Terzija V. Measurement-based transmission line parameter estimation with adaptive data selection scheme // IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. Vol. 9. Iss. 6. P. 5764–5773. https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2696619.
20. Shair Ja., Xie Xiaorong, Li Yunhong, Terzija V. Hardware-in-the-loop and field validation of a rotor-side subsynchronous damping controller for a series compensated DFIG system // IEEE Transactions on Power Delivery. 2020. Vol. 36. Iss. 2. P. 698–709. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.2989475.
21. Ding Lei, Guo Yichen, Wall P., Sun Kai, Terzija V. Identifying the timing of controlled islanding using a controlling UEP based method // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33. Iss. 6. P. 5913–5922. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2842709.
22. Ding Lei, Ma Zhenbin, Wall P., Terzija V. Graph spectra based controlled islanding for low inertia power systems // IEEE Transactions on Power Delivery. 2016. Vol. 32. Iss. 1. P. 302–309. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2582519.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir Terzija,
Professor of Energy Systems and Networks,
Center for Energy Science and Technology,
Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech),
Bolshoi Blvd, 30 (1), Moscow 121205, Russia
✉ v.terzija@skoltech.ru
https://orcid.org/0000-0002-6538-6982

Lei Ding,
Dean of School of Electrical Engineering
Shandong University,
Jingshi Road 17923, Jinan 250061, China
dinglei@sdu.edu.cn
https://orcid.org/0000-0002-1959-8044

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Терзия Владимир,
профессор энергетических систем и сетей,
Лаборатория современных энергетических систем,
Сколковский институт науки и технологий,
Территория Инновационного Центра «Сколково»,
121205, г. Москва, Большой бульвар, д. 30, стр. 1,
Россия
✉ v.terzija@skoltech.ru
https://orcid.org/0000-0002-6538-6982

Динг Лэй,
декан электротехнического факультета,
Шаньдунский университет,
250061, г. Цзинань, Дорога Цзинши 17923, Китай
dinglei@sdu.edu.cn
https://orcid.org/0000-0002-1959-8044

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

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 20.03.2024; approved after reviewing 15.04.2024; accepted for publication 20.04.2024.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 15.04.2024 г.; принята к публикации 20.04.2024 г.

iPolytech Journal 2024. Т. 28. № 2. С. 360-370 ISSN 2782-4004 (print)
2024;28(2):360-370 ISSN 2782-6341 (online)

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья
УДК 66.048.3.069.835
EDN: CKBJIB
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-360-370

Электрообезвоживание каменноугольной смолы – побочного продукта при получении кокса для доменной плавки

И.А. Головашов[1]✉, Д.И. Алексеев[2], А.В. Швалева[3]

[1-3]Новотроицкий филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», Новотроицк, Россия

Резюме. Целью исследования являлась адаптация технологии электрообезвоживания нефти применительно к каменноугольной смоле (побочного продукта при производстве кокса для доменной плавки) для удаления золы (фусов) и воды. Объектом исследований – каменноугольная смола, поступающая с коксовых батарей, которая с водой и золой образует коллоидную систему. В работе использовали метод электрообезвоживания, используемый в настоящее время для удаления воды из коллоидной системы нефть–вода. Рассмотрена конструкция электродегидратора 2-ЭГ-160-2, а также особенности подачи смолы в электродегидратор (в сравнении с подачей нефти). Показано, что в предлагаемом способе работы электродегидратора смола и фусы будут оседать в нижней части агрегата ввиду большей плотности воды (плотность смолы порядка 1200 кг/м^3 и более). Предложена схема включения электродегидратора в схему обеззоливания на коксохимическом предприятии. Произведен расчет процесса разделения каменноугольной смолы в электродегидраторе. В результате полученных в ходе расчетов показателей можно сделать вывод, что производительность данного оборудования при обезвоживании смолы (в отличие от нефти) значительно снижается, что связано с большей плотностью и вязкостью смолы. Вследствие высокой вязкости смолы по сравнению с вязкостью нефти (при 80 °С в ~ 40 раз) производительность электродегидратора по смоле составит ~40 тыс. т (для нефти ~ 1 млн т). Однако производительности в 40 тыс. т по одному электродегидратору достаточно, чтобы закрыть потребности по обезвоживанию каменноугольной смолы для АО «Уральская Сталь». В результате проведенных исследований предложено включение в общую схему обезвоживания каменноугольной смолы электродегидратора с целью достижения нормативных показателей смолы для дальнейшего ее применения и продажи в качестве целевого продукта. *Благодарности.* Данная работа выполнена в рамках проекта образовательно-производственных групп, реализуемых в сотрудничестве НФ НИТУ «МИСИС» и АО «Уральская Сталь».

Ключевые слова: чугун, кокс, смола, вода, фусы, коллоидная структура, разрушение

Благодарности. Данная работа была проведена в рамках проекта учебно-производственных групп, реализуемого совместно с НФ НИТУ «МИСиС» и ОАО «Уральская сталь».

Для цитирования: Головашов И.А., Алексеев Д.И., Швалева А.В. Электрообезвоживание каменноугольной смолы – побочного продукта при получении кокса для доменной плавки // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 360–370. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-360-370. EDN: CKBJIB.

METALLURGY

Original article

Electric dehydration of coal tar – a by-product of coke production for blast furnace smelting

Ilya A. Golovashov[1]✉, Danil I. Alekseev[2], Anna V. Shvaleva[3]

[1-3]University of Science and Technology “MISIS”, Novotroitsk, Russia

Abstract. The aim of the study was to adapt the technology of electric dehydration of oil for use with coal tar (a by-product of coke production for blast furnace smelting) in order to remove ash (tar decanter sludge) and water. The research focuses on coal tar generated in coke ovens, which forms a colloidal system with water and ash. The method of electric dehydration was employed in the study, which is currently used to remove water from the oil–water colloidal system. The construction of the 2-EG-160-2 electric dehydrator was examined, along with the specifics of introducing coal tar into it in comparison to oil. It was demonstrated that, under the proposed operational conditions for the electric dehydrator, the coal tar and tar decanter sludge would settle at the bottom of the unit due to their higher density than

© Головашов И.А., Алексеев Д.И., Швалева А.В., 2024

that of water (the density of coal tar is approximately 1200 kg/m^3 and higher). A scheme for integrating the electric dehydrator into the de-ashing process at a coke-chemical plant was proposed. The process of separating coal tar in the electric dehydrator was calculated. The results demonstrated that the efficiency of the equipment in the dehydration of coal tar, in comparison to oil, is considerably lower due to its higher density and viscosity (approximately 40 times higher at 80°C). Consequently, the performance of the electric dehydrator for coal tar would be approximately 40,000 tons, as opposed to approximately 1 million tons for oil. Nevertheless, the aforementioned performance per electric dehydrator is sufficient to meet the dehydration needs of AO "Ural Steel" for coal tar. Therefore, it is recommended that the electric dehydrator be integrated into the general coal tar dehydration scheme in order to ensure that the required quality standards for the tar are met, allowing it to be used and sold as a target product.

Keywords: cast iron, coke, resin, water, fuses, colloidal structure, destruction

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the project of training and production groups implemented in cooperation with the Novotroitsk Branch of the National Research Technical University of the Moscow Institute of Steel and Alloys and JSC «Ural Steel».

For citation: Golovashov I.A., Alekseev D.I., Shvaleva A.V. Electric dehydration of coal tar – a by-product of coke production for blast furnace smelting. *iPolytech Journal.* 2024;28(2):360-370. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-360-370. EDN: CKBJIB.

ВВЕДЕНИЕ

Черная металлургия является одной из базовых областей промышленности, которая позволяет формировать экономический суверенитет России, является опорой при реализации новых государственных проектов [1]. Металлургический комплекс крупнотоннажно выпускает широкий ассортимент продукции, востребованный как на территории России, так и за ее рубежом. Металлургические производства, как правило, выплавляют сталь для дальнейшего передела в готовую продукцию, которую получают при обработке чугуна. В настоящее время доменные производства интенсивно модернизируются, что связано с возросшими требованиями к чугуну и необходимостью выполнять требования экологических регламентов по выбросам. При модернизации доменного производства возрастают требования к сырью, в частности, к коксу и экологическим аспектам его производства [2, 3].

Металлургический кокс получают при спекании коксующихся марок углей при температуре 1050–1100°С. Основная химическая реакция, которая происходит с коксом в доменном процессе – это реакция Белла-Будуара, то есть взаимодействие углерода кокса с углекислым газом CO_2 с выделением оксида углерода CO. Оксид углерода CO, в свою очередь, является основным восстановителем оксидов железа в доменном процессе. Таким образом, металлургический кокс в доменном процессе выполняет три основных функции: выступает в качестве топлива и источника тепловой энергии для эндотермических процессов плавления чугуна и шлака; является восстановителем, поскольку из кокса образуется CO; слой кокса за счет своего размера (в среднем 40–60 мм) является газопроницаемой матрицей, «губкой», которая позволяет стекать шлаку и чугуну вниз, а доменным газам проходить вверх к колошнику через загрузку.

Основным преимуществом применения кокса по сравнению с альтернативными углеродосодержащими видами топлива (пылеугольное топливо, каменный уголь, древесный уголь) является способность кокса обеспечивать проницаемость слоя шихты доменной печи для газов, шлака и чугуна. Данное преимущество реализуется за счет того, что кокс обладает высокой механической прочностью по сравнению с альтернативными видами углеродосодержащего топлива, не разрушается при загрузке в скипы и доменную печь, нагрузке слоя шихтового материала. Вместе с тем необходимо отметить стремление металлургов снизить расход кокса в доменном процессе, поскольку кокс является самым дорогостоящим компонентом в шихтовой доменной загрузке (порядка 15–20 тыс. руб. за 1 т кокса). В последнее время развиваются технологии вдувания пылеугольного топлива [4–10] и природного газа [11–14]. Однако попытки полностью заменить кокс в доменном процессе пока не привели к успеху, поэтому на сегодняшний день наблюдается тенденция увеличения объемов производства кокса в мире [4].

Побочным продуктом при получении металлургического кокса является каменноугольная смола, которая представляет собой вязкую маслянистую жидкость с запахом нафталина. Каменноугольная смола является сырьем для производства нафталина и электродов для электрометаллургии. Потребители предъявляют к смоле ряд требо-

ваний в соответствии с ТУ 19.10.20-203-00190437-2020 «Смола каменноугольная» [15–17]. Смола с повышенной зольностью имеет меньшую технологическую ценность и меньшую стоимость при продаже. Кроме того, в случае, если каменноугольная смола не будет удовлетворять требованиям потребителей по своим параметрам, остро обозначится проблема ее утилизации, поскольку останавливать производство кокса не представляется возможным ввиду его востребованности и незаменимости в производстве стал. По этой причине важно снижать зольность полученной смолы. Зола в смоле сконцентрирована в фусах (частички угля и кокса в смоле). Фусы, вода и смола образуют устойчивую коллоидную систему, которую достаточно трудно разрушить. По классической технологии на коксохимических предприятиях предусмотрен процесс дешламации, который реализован с помощью центрифугирования смолы и выделения из нее твердых фусов. Основным аппаратом процесса дешламации является центрифуга типа ЦГПШ-450. Данная центрифуга, разработанная еще в СССР, имеет ряд существенных недостатков: а) низкую эффективность дешламации; б) высокую металлоемкость из-за большого диаметра ротора (вес центрифуги 28 т); в) низкую производительность по смоле (до 10 т/ч); г) частый выход из строя узлов среза фусов и отбора смолы и воды; д) низкую степень автоматизации; е) высокую вибрацию при срезе фусов; ж) является источником повышенной загазованности из-за отсутствия полной герметизации [18, 19].

В нефтепереработке распространен процесс электрообессоливания, который происходит в электродегидраторах. Обессоленная и обезвоженная нефть содержит 3-4 мг/дм^3 солей и до 0,1% по массе воды [20].

Цель исследования – адаптация технологии электрообезвоживания нефти применительно к каменноугольной смоле для удаления фусов и воды с использованием стандартного оборудования, применяемого в нефтепереработке, – электродегидратора 2ЭГ160-2 (взамен классической технологии[4]).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема электродегидратора 2ЭГ160-2 представлена на рис. 1. Характеристики данного оборудования представлены в табл. 1.

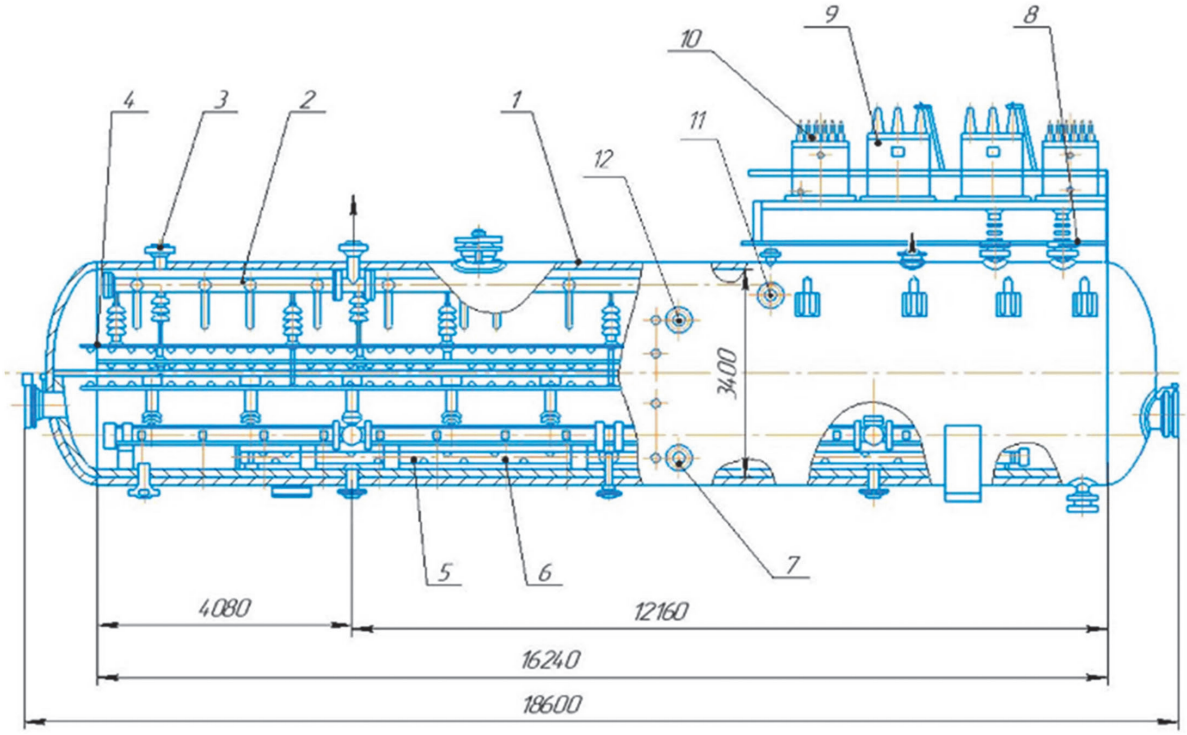


Рис. 1. *Общий вид электродегидратора 2ЭГ-160-2*
Fig. 1. *General view of 2ЭГ-160-2 electrical dehydrator*

[4]Прокофьева Т.В., Андриканис В.В., Круглов С.С., Гафарова Э.Б. Расчет электродегидратора: учеб. пособ. М.: ИЦ РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2016. 31 с.

Таблица 1. Характеристика 2ЭГ160-2
Table 1. 2ЭГ160-2 specifications

Показатель	Значение
Длина	18650 мм
Внутренний диаметр	3400 мм
Толщина стенки	25 мм
Высота	5700 мм
Номинальный объем	160 м^3
Производительность	<450 м^3/ч (<360 т/ч)
Расчетная температура	<160 °С
Расчетное давление	<1,8 МПа
Первичное напряжение трансформатора	380 В
Вторичное напряжение трансформатора (между электродами)	22; 33; 44 кВ
Масса аппарата	60 т
Частота переменного тока	50 Гц
Расчетный ток	50 А
Мощность источника питания	160 кВт

Принцип удаления из нефти золы и воды в электродегидраторе следующий. Продукт в электродегидратор поступает через штуцер (7) и попадает в распределительный коллектор (6) в нижнюю часть корпуса электродегидратора под промывную воду, которая подается через штуцер (12), при этом более легкая нефть (меньшая плотность) поднимается вверх электродегидратора, а промывная вода (большая плотность) опускается вниз. Таким образом, в электродегидраторе организован противоточный процесс промывки нефти и ее обессоливания. Распределитель исходного сырья представляет собой коллектор, проходящий по всему аппарату, с присоединенными к нему горизонтальными отводами. Обессоленная нефть выводится через верхний штуцер (11). На высоте чуть больше половины аппарата прикреплены два рамных прямоугольных электрода (4) один над другим. В процессе противоточного движения нефти и воды на них воздействует электрическое поле, организованное с помощью электрода (4). Электроды расположены на расстоянии в 25–40 см друг от друга. Под воздействием слабого электрического поля, возникающего между поверхностью воды и нижним электродом, по пути нефти в межэлектродное пространство из нее выпадают крупные частицы воды. В сильное электрическое поле поступает нефть с более мелкими частичками воды, которым необходимо воздействие поля с большей напряженностью. Происходит слипание мелких частичек воды в капли, которые находятся в неполярной жидкости, поляризуются, вытягиваются в форму эллипсов с противоположно заряженными концами и притягиваются друг к другу. При их сближении силы притяжения вырастают до величины, позволяющей сдавить и разорвать разделяющую их пленку. Капли, сталкиваясь друг с другом, укрупняются и осаждаются под действием силы тяжести. Происходит разрушение коллоидной системы. Два фарфоровых изолятора, расположенные в средней части электродегидратора и проходящие через всю его длину, крепятся к корпусу аппарата с помощью подвесных изоляторов (8), выполненных из фарфоровых гирлянд. Выход воды из электродегидратора производится через дренажный коллектор (5) и штуцер, находящийся автоматически по уровню. Питание идет от двух трансформаторов типа ОМ-66/35 мощностью 5 кВт.

Схема работы электродегидратора 2ЭГ160-2 в технологической схеме нефтеперерабатывающего предприятия представлена на рис. 2.

Сырая нефть попадает в сырьевой насос (1), а далее в теплообменники (2) и паровой подогреватель (3). После подогревателя нефть поступает в термоотстойник (4), где происходит отделение крупных частиц воды путем отстаивания. На пути транспортирования из термоотстойника в электродегидратор нефть смешивают с щелочью, прошедшей через дозировочный насос (9). Смешанная со щелочью нефть попадает в электодегидратор (5), где происходит первая стадия отделения мелких частиц воды. После первой ступени обессоленный продукт следует во

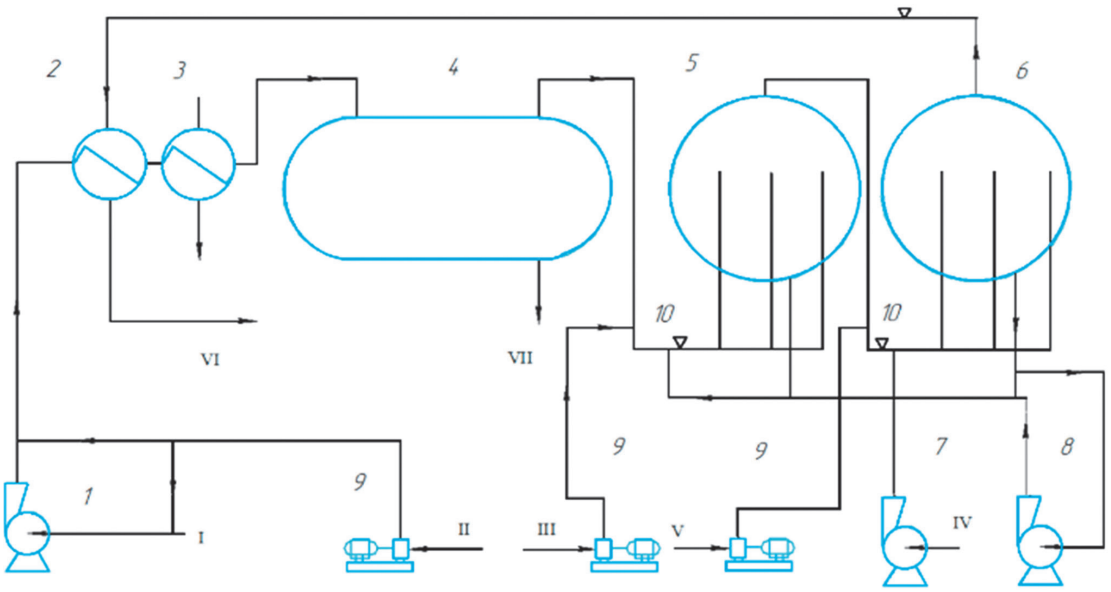


Рис. 2. *Принципиальная схема работы электрообессоливающей установки на основе аппарата 2ЭГ160-2*
Fig. 2. *Schematic circuit diagram of the crude desalter unit based on the 2ЭГ160-2 apparatus*

второй электродегидратор (6), смешиваясь с водяным паром, где происходит повторное обессоливание. Полученная обессоленная нефть проходит через теплообменник (2) в хранилище, а отделившаяся вода идет на второй цикл. Процессы обезвоживания и обессоливания нефти обычно проводят совместно. После первой ступени – отделения от нефти части воды, насыщенной минеральными солями – в нее добавляют промывную воду с относительно малым содержанием разных солей.

Существенным различием между нефтяной коллоидной системой нефть–вода–соли и системой фусы–смола–вода является плотность. Нефть имеет плотность меньше плотности воды (1000 кг/м^3) и составляет порядка 780–860 кг/м^3, тогда как смола имеет плотность порядка 1200 и более кг/м^3 [21, 22]. По указанной причине при работе электродегидратора на разрушение коллоидной системы фусы–смола–вода, а не нефтяной, смола и фусы будут оседать в нижней части электродегидратора, а вода в верхней, тогда как нефть выходит из верхней части электродегидратора. Из этого следует, что смолу в электродегидратор необходимо подавать сверху, а промывочную воду снизу (нефть подается снизу, а вода сверху)[5]. Таким образом, на ввод смолы в электродегидратор необходимо осуществлять через штуцер 11, а воды через штуцер 7. Поскольку в электродегидраторе не предусмотрено механической очистки днища, то отстаивание смолы от фусов после разрушения коллоидной системы фусы–смола–вода в электродегидраторе необходимо проводить в отдельном аппарате, например, первичном отстойнике.

Предлагаемая схема электрообессоливающей установки (ЭЛОУ) на основе электродегидратора 2ЭГ160-2 для разрушения коллоидной системы фусы–смола–вода представлена на рис. 3.

Образующаяся смола с производства проходит в сборник приема смолы (1), откуда она через насос (2) транспортируется в смеситель (3), где смешивается с промывочной надсмольной водой. Вода, в свою очередь, проходит через насос (2), прежде чем попасть в смеситель (3). После смешивания смесь попадает в электродегидратор, где происходит разделение смолы, воды и фусов. Также в электродегидратор поступает деэмульгатор, предварительно смешанный с надсмольной водой в смесителе (3). В электродегидраторе (4) происходит разделение воды, смолы и фусов. Отделившаяся вода выходит через верхний штуцер, смола в средний штуцер на корпусе, а фусы – через нижний штуцер. Отделившиеся смеси поступают в мехосветлитель (5), откуда происходит транспортировка. Преимуществом данной

[5]Бондаренко Б.И. Альбом технологических схем процессов переработки нефти и газа: учеб. пособ. М.: Химия, 1983. 128 с.

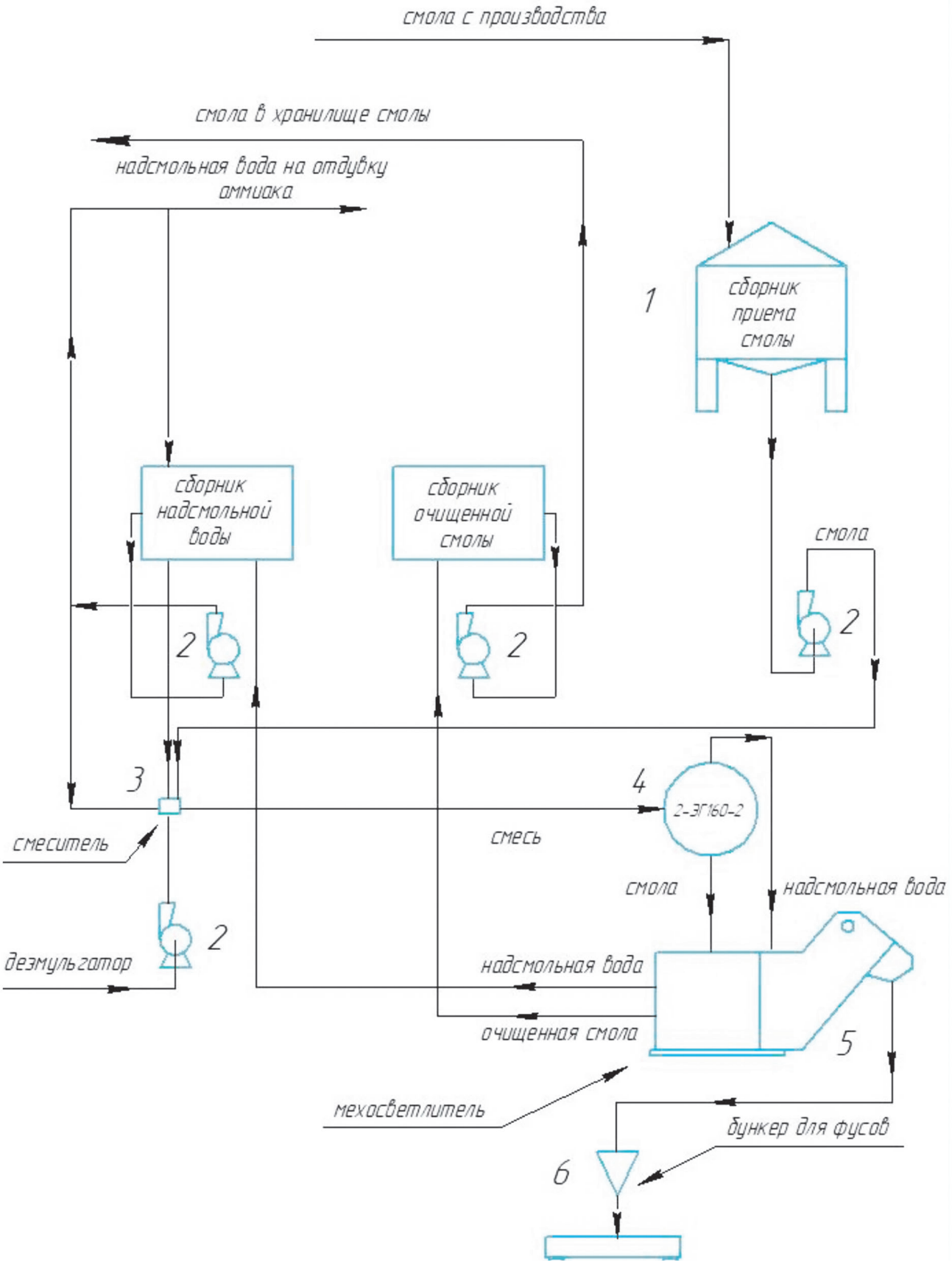


Рис. 3. *Технологическая схема ЭЛОУ*
Fig. 3*. Desalter flow diagram*

системы будет служить более качественная обработка смолы относительно обработки на установке дешламации. В нашей работе мы проводим исследование установки электродегидратора 2ЭГ-160-2.

Расчет скорости осаждения капель воды передается следующей зависимостью [23, 24]:

$$w_0 = \frac{1}{18}.\frac{g.d^2\left(\dot{\rho}_{\text{воды}} - \dot{\rho}_{\text{н}}\right)}{\nu_{\text{н}}.\dot{\rho}_{\text{н}}},$$

где g – ускорение свободного падения, м^2/с; d – диаметр осаждающейся капли, м; $\rho_{\text{воды}}$ плотность воды; $\rho_{\text{н}}$ – плотность нефти, кг/м^3; $v_{\text{н}}$ – кинематическая вязкость нефти, м^2/с.

Режим осаждения, критерий Рейнольдса, рассчитывается по следующей формуле:

$$Re = \frac{w_0.d}{\nu_{\text{н}}^{80}},$$

где w_o – скорость осаждения капель воды, м/с; d – диаметр осаждающейся капли, м; $v_{\text{н}}$ – кинематическая вязкость нефти, м^2/с.

Производительность 2ЭГ-160-2 по сырью рассчитывается по формуле:

$$G = \frac{1}{72}.L.D.\frac{gd^2\left(\dot{\rho}_{\text{воды}}^{80} - \dot{\rho}_{\text{н}}^{80}\right)}{\nu_{\text{н}}^{80}.\dot{\rho}_{\text{н}}^{80}},$$

где L – длина аппарата, м; D – внутренний диаметр аппарата, м; g – ускорение свободного падения, м^2/с; d – диаметр осаждающейся капли, м; $\dot{\rho}_{\text{воды}}$ – плотность воды $\rho_{\text{н}}$ – нефти соответственно, кг/м^3; $v_{\text{н}}$ – кинематическая вязкость нефти, м^2/с.

Формулы реализованы в табличном процессоре. Исходные данные для расчета представлены в табл. 2, 4, результаты расчетов сведены в табл. 3, 5 [25].

Таблица 2. Исходные данные расчета по смоле
Table 2. Initial calculation data for resin

№	Исходные данные	Значение
1	Наименьший диметр капель воды d, м	0,00022
2	Плотность воды $P_{\text{воды}}$ при 80 °С, кг/м^3	980
3	Кинематическая вязкость смолы $\nu_{\text{н}}$ при 80 °С, м^2/с	0,000075
4	Плотность смолы $P_{\text{н}}$ при 80 (плотность нефти), кг/м^3	1220
5	Длина аппарата L, м	18,6
6	Диаметр аппарата D, м	3,4

Таблица 3. Расчетные данные по смоле
Table 3. Resin calculation data

№	Параметр	Значение
1	Скорость осаждения капель воды в неподвижной среде Wo, м/с	$6{,}9{\cdot}10^{-5}$
2	Условие применения уравнения Стокса Re, безразмерная величина	$2{,}03{\cdot}10^{-4}$
3	Производительность электродегидратора, м^3/с	0,0011
4	Производительность электродегидратора, м^3/ч	3,938
5	Производительность электродегидратора, т/ч	4,804
6	Производительность электродегидратора, т/сут	115,302
7	Производительность электродегидратора, т/мес.	3459,065
8	Производительность электродегидратора, т/год	41509
9	Производительность коксохимичсекого производства по смоле, т/год	40000

Таблица 4. Исходные данные расчета по нефти
Table 4. Initial calculation data for oil

№	Исходные данные	Значение
1	Наименьший диметр капель воды d, м	0,00022
2	Плотность воды $P_{\text{воды}}$ при 80 °С, кг/м^3	958
3	Кинематическая вязкость нефти $\nu_{\text{н}}$ при 80, м^2/с	1,95E-06
4	Плотность нефти $P_{\text{н}}$ при 80 (плотность нефти), кг/м^3	794,8
5	Длина аппарата L, м	18,6
6	Диаметр аппарата D, м	3,4

Таблица 5. Расчетные данные по нефти
Table 5. Oil calculation data

№	Параметр	Значение
1	Скорость осаждения капель воды в неподвижной среде W_o, м/с	0,0028
2	Режим осаждения, критерий Рейнольдса Re, безразмерная величина	0,313
3	Производительность электродегидратора, м^3/с	0,044
4	Производительность электродегидратора, м^3/ч	158,0
5	Производительность электродегидратора, т/ч	125,6
6	Суточная производительность производительность электродегидратора, т/сут	3015
7	Месячная производительность электродегидратора, т/мес.	90468
8	Годовая производительность электродегидратора, т/год	1085614

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставляя данные табл. 3 и 5, можно сделать вывод, что производительность электродегидратора 2ЭГ-160-2, используемого для разрушения коллоидной системы фусы–смола–вода, значительно ниже аналогичного показателя при проведении операции разрушения коллоидной системы нефть–вода–соли (1 млн т год, против 41 тыс. т в год), что связано с большей плотностью и вязкостью смолы. Тем не менее для решения задачи разрушения коллоидной системы фусы–смола–вода в условиях коксохимического производства АО «Уральская Сталь» при годовом производстве каменноугольной смолы в 40 тыс. т в год производительности электродегидратора достаточно (см. табл. 3, строки 8 и 9) [26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одной из существующих проблем на металлургическом предприятии АО «Уральская Сталь» является повышенная зольность каменноугольной смолы (побочного продукта при производстве кокса, используемого в доменной плавке), что снижает ее стоимость на рынке, а также приводит к коммерческим спорам с потребителями. Анализ классического метода дешламации смолы показал, что центрифугирование смолы с помощью центрифуг старого образца неэффективно. Для решения проблемы дешламации мы предложили метод электрообессоливания, который применяется в нефтепереработке, в основе которого лежит промывка нефти с разрушением коллоидной системы нефть–вода под действием электростатических сил. Аналогичным образом предлагается разрушать коллоидную систему фусы–смола–вода. Особенностью работы электродегидратора при разрушении коллоидной системы фусы–смола–вода является необходимость подавать смолу сверху, а воду снизу, что связано с тем, что плотность смолы больше, чем воды в отличие от нефти. В работе проведен расчет процесса отстаивания смолы на основе стандартного расчета отстаивания нефти. Расчетом показано, что производительность электродегидратора по смоле значительно ниже, чем по нефти (1 млн т нефти в год против 41 тыс. т смолы). Однако для условий АО «Уральская Сталь» с годовым объемом производства смолы в 40 тыс. т производительности 2-ЭГ-160-2 достаточно. Зола смолы в основном сконцентрирована в фусах – частицах угля и кокса. Поскольку в электродегидраторе стандартной конструкции не предусмотрены скребки, то в дополнение к нему должен идти первичный отстойник для конечного удаления фусов. В работе предложена также схема подключения электродегидратора и первичного отстойника в действующей схеме движения смолы на АО «Уральская Сталь». В результате проведенной работы предложено адаптировать стандартный электродегидратор для решения задачи дешламации смолы на коксохимическом производстве.

Список источников

1. Еремина А.И., Гущина Е.Г. Разработка механизмов развития металлургического производства в регионах России (на примере Волгоградской области) // Modern Economy Success. 2020. № 5. С. 232–234. EDN: IQMQSV.
2. Леонтьев Л., Григорович К. Черная металлургия: состояние и перспективы // Наука в России. 2011. № 4. С. 46–50. EDN: OIWHUN.
3. Shatokhin I.M., Kuz'min A.L., Smirnov L.A., Leont'ev L.I., Bigeev V.A., Manashev I.R. New method for processing metallurgical wastes // Metallurgist. 2017. Vol. 61. No. 7-8. P. 523–528. https://doi.org/10.1007/s11015-017-0527-4.

4. Diez M.A., Alvarez R.A., Barriocanal C. Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking // International Journal of Coal Geology. 2002. Vol. 50. Iss. 1. P. 389–412. https://doi.org/10.1016/S0166-5162(02)00123-4.
5. Шаповалова Н.Г., Гуменная С.Н. Сравнительный анализ показателей расхода энергоносителей на приготовление и вдувание пылеугольного топлива в горны доменных печей металлургических предприятий Украины // Экология и промышленность. 2018. № 1. С. 92–96. EDN: XOWGVV.
6. Подкорытов А.Л., Кузнецов А.М., Зубенко А.В., Падалка В.П., Ярошевский С.Л., Кочура В.В. Освоение технологии доменной плавки с вдуванием в горн пылеугольного топлива на ЧАО «Енакиевский металлургический завод» // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 10. С. 53–65. EDN: ZRWQXV.
7. Филиппов В.В., Михалев В.А., Миронов К.В., Форшев А.А., Тлеугабулов Б.С., Загайнов С.А. Развитие теории и технологии выплавки ванадиевого чугуна с применением пылеугольного топлива // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 4. С. 22–26. EDN: ZBQQXN.
8. Миронов К.В., Михалев В.А., Буньков А.А., Загайнов С.А., Гилева Л.Ю. Опыт вдувания пылеугольного топлива при выплавке ванадиевого чугуна на ЕВРАЗ НТМК // Сталь. 2015. № 5. С. 17–19. EDN: UADBEV.
9. Ярошевский С.Л., Кузнецов А.М., Курбатов Ю.Л., Кочура В.В., Афанасьева З.К. Исследование особенностей теплообмена в фурменной зоне доменной печи при вдувании ПУТ // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 4. С. 14–22. EDN: ZBQQXD.
10. Мирошниченко В.Г., Скляр А.В. Эффективное освоение пылеугольной технологии в доменном цехе ПАО «Алчевский металлургический комбинат» // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2016. № 4. С. 24–30. EDN: VXBAJP.
11. Сорокин А.Ю., Пишикин А.А, Дагман А.И., Басов В.И., Титов В.Н., Загайнов С.А. Освоение технологии доменной выплавки чугуна с использованием пылеугольного топлива в доменном цехе № 2 ПАО НЛМК // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. № 7. С. 803–810. https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-7. EDN: IUXGGQ.
12. Лялюк В.П. Анализ работы доменной печи объемом 5000 м^3 на фурмах разного диаметра с позиций полных механических энергий потоков комбинированного дутья и горнового газа // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 7. С. 691–699. https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-7-691-699. EDN: KJATLV.
13. Семенов Ю.С., Подкорытов А.Л., Горупаха В.В., Семион И.Ю., Оробцев А.Ю., Шумельчик Е.И. Повышение эффективности использования пылеугольного топлива при производстве чугуна и обжиге известняка в нестабильных технологических условиях // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 7. С. 676–690. https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-7-676-690. EDN: ZMUAZL.
14. Смирнов Л.А., Тлеугабулов Б.С., Загайнов С.А., Пыхтеева К.Б., Филиппов В.В., Михалев В.А., Миронов К.В. Некоторые теоретические аспекты технологии совместного вдувания природного газа и пылеугольного топлива // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2016. № 5. С. 19–23. EDN: WBFSKN.
15. Рогожников С.П., Рогожников И.С. Влияние водорода природного газа на изменение теплового и восстановительного процессов по радиусу доменной печи // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. № 1. С. 41–50. EDN: HJSUBA.
16. Волощук Т.Г. Анализ влияния различных факторов на качество каменноугольной смолы // Наука и производство Урала. 2017. № 13. С. 9–12. EDN: ZCJBWZ.
17. Банников Л.П., Мирошниченко Д.В., Нестеренко С.В., Балаева Я.С., Фатенко С.В. Влияние содержания неокисленных пылевидных классов коксуемой шихты на свойства каменноугольной смолы // Наука и производство Урала. 2019. № 3. С. 15–22. EDN: USRMJL.
18. Степанов Е.Н., Артюшечкин Д.А., Дуць Н.В., Смирнов А.Н., Волощук Т.Г. Влияние технологических факторов на качество каменноугольный смолы // Кокс и химия. 2021. № 12. С. 38–41. https://doi.org/10.52351/00232815_2021_12_38. EDN: RXPIKB.
19. Оплеухин С.А., Пукиш В.И., Доровских О.А. Установка дешламации смолы // Кокс и химия. 2011. № 11. С. 33–35. EDN: OJMYVT.
20. Filoneko Yu.Ya., Konev N.L., Parakhin A.V. Mathematical-statistical prediction of blast furnace coke quality // Кокс и химия. 1991. № 1. EDN: GKWZYH.
21. Вейненский В.В., Барский В.Д. Зависимость реакционной способности кокса от величины зольности и состава золы // Кокс и химия. 1990. № 12. С. 9–12. EDN: QKLBPM.
22. Симакова А.В., Климчук В.А., Папин А.В., Герман Л.В. Каменноугольная смола и факторы влияния на ее характеристики // Химия и химическая технология: достижения и перспективы: материалы VI Всерос. конф. (г. Кемерово, 29–30 ноября 2022 г.). Кемерово: КузГТУ им. Т.Ф. Горбачёва, 2022. С. 402.1–402.4.
23. Мельников И.И., Крячук В.М., Мезин Д.А., Горбунов А.А., Волощук Т.Г. Влияние нефтяной коксующей добавки на качество каменноугольной шихты, кокса и смолы // Кокс и химия. 2011. № 12. С. 21–23. EDN: OKFLNV.
24. Андрейков Е.И., Красникова О.В., Диковинкина Ю.А., Первова М.Г., Зорин М.В., Купрыгин В.В. Характеристики смолы высокотемпературного коксования нефтяного кокса с высоким содержанием летучих веществ // Кокс и химия. 2019. № 12. С. 38–43. EDN: FIEKEL.

25. Саранчук В.И. Математическое описание основных процессов коксохимического производства // Кокс и химия. 1999. № 8. С. 34–37. EDN: RKPZIJ.
26. Кочкин Р.О. Прогноз качества кокса по показателям CSR и CRI // Кокс и химия. 2009. № 10. С. 17–23. EDN: KWHPWX.

References

1. Eremina A.I., Gushchina E.G. Development of mechanisms of development of metallurgical production in the Russian regions (on the example of Volgograd region). *Modern Economy Success*. 2020;5:232-234. EDN: IQMQSV.
2. Leont'ev L., Grigorovich K. Ferrous metallurgy: modern state and prospects. *Nauka v Rossii*. 2011;4:46-50. (In Russ.). EDN: OIWHUN.
3. Shatokhin I.M., Kuz'min A.L., Smirnov L.A., Leont'ev L.I., Bigeev V.A., Manashev I.R. New method for processing metallurgical wastes. *Metallurgist.* 2017;61(7-8):523-528. https://doi.org/10.1007/s11015-017-0527-4.
4. Diez M.A., Alvarez R.A., Barriocanal C. Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking. *International Journal of Coal Geology*. 2002;50(1):389-412. https://doi.org/10.1016/S0166-5162(02)00123-4.
5. Shapovalova N.G., Gumennaya S.N. Comparative analysis of indicators of utility consumption in process of preparation and injection of pulverized-coal fuel in blast furnace wells in metallurgical enterprises of Ukraine. *Ekologiya i promyshlennost'.* 2018;1:92-96. (In Russ.). EDN: XOWGVV.
6. Podkorytov A.L., Kuznecov A.M., Zubenko A.V., Padalka V.P., Yaroshevskij S.L., Kochura V.V. Mastering the technology for the blast furnace heat with the injection of the pulverized coal fuel into the hearth at the chao "Enakievskiy metallurgicheskiy zavod". *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information.* 2017;10:53-65. (In Russ.). EDN: ZRWQXV.
7. Filippov V.V., Mihalev V.A., Mironov K.V., Forshev A.A., Tleugabulov B.S., Zagainov S.A. Development of the theory and technology of smelting vanadium cast iron using pulverized coal fuel. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2017;4:22-26. (In Russ.). EDN: ZBQQXN.
8. Mironov K.V., Mikhalev V.A., Bun'kov A.A., Zagainov S.A., Gileva L.Yu. Experience of pulverized coal fuel injection under vanadium cast iron smelting at EVRAZ NTMK. *Stal'*. 2015;5:17-19. (In Russ.). EDN: UADBEV.
9. Yaroshevskij S.L., Kuznetsov A.M., Kurbatov Yu.L., Kochura V.V., Afanasieva Z.K. Studying heat transfer features in the tuyere zone of a blast furnace under pulverized coal injection. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information.* 2017;4:14-21. (In Russ.). EDN: ZBQQXD.
10. Miroshnichenko V.G., Sklyar A.V. Effective development of pulverized coal technology in the blast furnace shop of PJSC Alchevsk Metallurgical Plant. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2016;4:24-30. (In Russ.). EDN: VXBAJP.
11. Sorokin A.Yu., Pishikin A.A, Dagman A.I., Basov V.I., Titov V.N., Zagajnov S.A. Mastering the technology of blast furnace smelting of pig iron using pulverized coal fuel in the blast furnace shop no. 2 of PJSC NLMK. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2019;7:803-810. (In Russ.). https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-7. EDN: IUXGGQ.
12. Lyalyuk V.P. Analysis of the blast furnace operations with a volume of 5000 m^3 on tuyeres of different diameters from the positions of full mechanical energies of flows of combined blow and hearth gas. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2020;76(7):691-699. (In Russ.). https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-7-691-699. EDN: KJATLV.
13. Semenov Yu.S., Podkorytov A.L., Gorupakha V.V., Semion I.Yu., Orobytsev A.Yu., Shumel'chik E.I. Efficiency Increase of powdered coal application at hot metal production and limestone calcination under unstable technology conditions. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2020;7:676-690. (In Russ.). https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-7-676-690. EDN: ZMUAZL.
14. Smirnov L.A., Tleugabulov B.S., Zagainov S.A., Pykhteeva K.B., Filippov V.V., Mikhalev V.A., Mironov K.V. Some theoretical aspects of the technology of joint injection of natural gas and pulverized coal. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2016;5:19-23. (In Russ.). EDN: WBFSKN.
15. Rogozhnikov S.P., Rogozhnikov I.S. Effect of the natural gas hydrogen on variation of the heat and reducing processes along the blast furnace radius. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2020;1:41-50. (In Russ.). EDN: HJSUBA.
16. Voloshchuk T.G. Analysis of affection of various factors on the quality of coal tar. *Nauka i proizvodstvo Urala*. 2017;13:9-12. (In Russ.). EDN: ZCJBWZ.
17. Bannikov L.P., Balaeva Y.S., Miroshnichenko D.V., Fatenko S.V., Nesterenko S.V. Influence of small coal particles in coking batch on coal-tar quality. *Nauka i proizvodstvo Urala*. 2019;3:15-22. (In Russ.). EDN: USRMJL.
18. Stepanov E.N., Artyushechkin D.A., Duts N.V., Smirnov A.N., Voloschuk T.G. Influence of production conditions on the quality of coal tar. *Koks i himiya.* 2021;12:38-41. (In Russ.). https://doi.org/10.52351/00232815_2021_12_38. EDN: RXPIKB.
19. Opleukhin S.A., Pukish V.I., Dorovskikh O.A. Slurry removal from tar. *Koks i himiya.* 2011;11:33-35. (In Russ.). EDN: OJMYVT.
20. Filoneko Yu.Ya., Konev N.L., Parakhin A.V. Mathematical-statistical prediction of blast furnace coke quality. *Koks i himiya.* 1991;1. EDN: GKWZYH.

21. Vejnenskij V.V., Barskij V.D. Dependence of coke reactivity on ash content and ash composition. *Koks i himiya*. 1990;12:9-12. (In Russ.). EDN: QKLBPM.
22. Simakova A.V., Klimchuk V.A., Papin A.V., German L.V. Coal tar and factors influencing its characteristics. In: *Himiya i himicheskaya tekhnologiya: dostizheniya i perspektivy: materialy VI Vserossijskoj konferencii = Chemistry and chemical technology: achievements and prospects: materials of the 6th All-Russian conference*. 29–30 November 2022, Kemerovo. Kemerovo: T.F. Gorbachev State Technical University; 2022, p. 402.1-402.4. (In Russ.).
23. Mel'nikov I.I., Kryachuk V.M., Mezin D.A., Gorbunov A.A., Voloshchuk T.G. Influence of petroleum coking additive on the quality of coal batch, coke, and tar. *Koks i himiya*. 2011;12:21-23. (In Russ.). EDN: OKFLNV.
24. Andreikov E.I., Krasnikova O.V., Dikovinkina Y.A., Pervova M.G., Zorin M.V., Kuprygin V.V. Characteristics of high-temperature coking tar of volatile-rich petroleum coke. *Koks i himiya*. 2019;12:38-43. (In Russ.). EDN: FIEKEL.
25. Saranchuk V.I. Mathematical description of the main processes of coke production. *Koks i himiya*. 1999;8:34-37. (In Russ.). EDN: RKPZIJ.
26. Kochkin R.O. Forecast of coke quality based on CSR and CRI indicators. *Koks i himiya*. 2009;10:17-23. (In Russ.). EDN: KWHPWX.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Головашов Илья Александрович,
студент,
Новотроицкий филиал Национального
исследовательского технического университета
Московского института стали и сплавов,
462359, г. Новотроицк, ул. Фрунзе, д. 8, Россия
✉ golovashovilya56@yandex.ru

Алексеев Данил Игоревич,
к.т.н.,
доцент кафедры математики и естествознания,
Новотроицкий филиал Национального
исследовательского технического университета
Московского института стали и сплавов,
462359, г. Новотроицк, ул. Фрунзе, д. 8, Россия
alekseev41047@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-7917-2299

Швалева Анна Викторовна,
канд. пед. наук, доцент,
доцент кафедры математики и естествознания,
Новотроицкий филиал Национального
исследовательского технического университета
Московского института стали и сплавов,
462359, г. Новотроицк, ул. Фрунзе, д. 8, Россия
shvaleva.1978@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilya A. Golovashov,
Student,
Novotroitsk Branch of the
National Research Technical University
of the Moscow institute of Steel and Alloys,
8 Frunze St., Novotroitsk 462359, Russia
✉ golovashovilya56@yandex.ru

Danil I. Alekseev,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the
Department of Mathematics and Natural Sciences,
Novotroitsk Branch of the
National Research Technical University
of the Moscow institute of Steel and Alloys,
8 Frunze St., Novotroitsk 462359, Russia
alekseev41047@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-7917-2299

Anna V. Shvaleva,
Cand. Sci. (Ped.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Mathematics and Natural Sciences,
Novotroitsk Branch of the
National Research Technical University
of the Moscow institute of Steel and Alloys,
8 Frunze St., Novotroitsk 462359, Russia
shvaleva.1978@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 28.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 03.06.2024 г.; принята к публикации 05.06.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 28.04.2024; approved after reviewing 03.06.2024; accepted for publication 05.06.2024.

iPolytech Journal 2024. Т. 28. № 2. 371-385 ISSN 2782-4004 (print)
2024;28(2):371-385 ISSN 2782-6341 (online)

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья
УДК 661.681
EDN: ZQSVVT
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-371-385

Исследование распределения бора между кремнием и шлаками систем $CaO-SiO_2$, $MgO-SiO_2$, $CaO-MgO-SiO_2$, $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ в восстановительных условиях

А.А. Ильин[1], И.А. Пикалова[2], Н.Н. Зобнин[3]✉

[1-3]*Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Республика Казахстан*

Резюме. Цель – изучение распределения бора между кремнием и шлаком систем $CaO-SiO_2$, $MgO-SiO_2$, $CaO-MgO-SiO_2$, $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ в восстановительных условиях для определения принципиальной возможности и условий применения борсодержащих материалов для устранения ошлакования плавильной зоны при выплавке технического кремния в рудотермических печах. В качестве объекта исследования применялись модельные шлаки, полученные сплавлением оксидов марки ХЧ, а также сплавы на основе кремния с примесью бора. Кремний использовался качества 5N производства ТОО «Kazakhstan Solar Silicon». Сплавы с бором изготавливались самостоятельно сплавлением кремния с бором. Эксперименты проводились путем выдержки в графитовых тиглях шлака и сплавов в жидком состоянии при температуре 1600 °С в слабо восстановительных условиях. Содержание бора в образцах шлака и кремния анализировалось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. В результате исследований установлено, что коэффициент распределения бора в вышеуказанных системах составляет от 2 до 2,5 во всей области расплавов этих систем при 1600 °С. Показано, что коэффициент распределения бора уменьшается с увеличением содержания Al_2O_3 в трехкомпонентной системе $CaO-Al_2O_3-SiO_2$, что согласуется с аналогичными данными, полученными другими авторами. Показано, что при использовании в экспериментах графитовых тиглей создаются восстановительные условия, приближенные к условиям рабочей подины рудотермической печи. Соответственно, это обеспечило получение более адекватных данных при прогнозировании равновесного содержания бора в кремнии (в сравнении с экспериментами, проводимыми в глиноземных тиглях другими авторами). Также установлено, что коэффициент распределения бора не зависит от содержания оксида магния в двойной ($MgO-SiO_2$) и трехкомпонентной ($CaO-MgO-SiO_2$) системах. Таким образом, полученные в исследованиях результаты позволяют исключить ограничения по содержанию бора в борсодержащих флюсах при выплавке технического кремния.

Ключевые слова: кремний технический, бор, шлаки, коэффициент распределения бора, восстановительный процесс

Для цитирования: Ильин А.А., Пикалова И.А., Зобнин Н.Н. Исследование распределения бора между кремнием и шлаками систем $CaO-SiO_2$, $MgO-SiO_2$, $CaO-MgO-SiO_2$, $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ в восстановительных условиях // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 371–385. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-371-385. EDN: ZQSVVT.

METALLURGY

Original article

Study of boron distribution between silicon and slags of $CaO-SiO_2$, $MgO-SiO_2$, $CaO-MgO-SiO_2$, and $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ systems under reducing conditions

Alexander A. Ilin[1], Irina A. Pikalova[2], Nikolay N. Zobnin[3]✉

[1-3]*Karaganda Industrial University, Temirtau, Republic of Kazakhstan*

Abstract. We study the distribution of boron between silicon and slag of the $CaO-SiO_2$, $MgO-SiO_2$, $CaO-MgO-SiO_2$, and $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ systems under reducing conditions with the purpose of determining the feasibility of using boron-containing materials to eliminate slagging in the melting zone during industrial silicon smelting in ore smelting furnaces. To that end, we used model slags obtained by melting chemically pure oxides, as well as silicon-based alloys with an admixture of boron. High-purity 5N silicon produced by Kazakhstan Solar Silicon LLP was used. Boron alloys were

© Ильин А.А., Пикалова И.А., Зобнин Н.Н., 2024

manufactured independently by melting silicon with boron. The experiments included holding liquid slag and alloys in graphite crucibles at a temperature of 1600 °C under poorly reducing conditions. The boron content in slag and silicon samples was analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry. The boron distribution coefficient in the above systems was established to range from 2 to 2.5 for the entire melt area of these systems at 1600 °C. The boron distribution coefficient was demonstrated to decrease under an increase in the content of Al_2O_3 in the $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ triplet system, which agrees with the data obtained by other authors. The use of graphite crucibles in experiments creates reducing conditions, similar to those in the hearth of an ore smelting furnace. Therefore, this approach provides more adequate data in predicting the equilibrium boron content in silicon in comparison with the experiments conducted using alumina crucibles by other authors. It was also found that the boron distribution coefficient does not depend on the magnesium oxide content in double ($MgO-SiO_2$) and triplet ($CaO-MgO-SiO_2$) systems. In conclusion, our results lift restrictions on the content of boron in boron-containing fluxes during industrial silicon smelting.

Keywords: technical silicon, boron, slags, boron distribution coefficient, reduction process

For citation: Ilin A.A., Pikalova I.A., Zobnin N.N. Study of boron distribution between silicon and slags of $CaO-SiO_2$, $MgO-SiO_2$, $CaO-MgO-SiO_2$, and $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ systems under reducing conditions. *iPolytech Journal.* 2024;28(2):371-385. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-371-385. EDN: ZQSVVT.

ВВЕДЕНИЕ

Металлургия цветных металлов и сплавов на их основе очень важна для мировой экономики. Отдельно в этой отрасли стоит технический кремний, более известный в англоязычной литературе как кремний металл (от англ. Silicon Metal). Формально он является не металлом, а переходным элементом, но при этом широко используется для получения широкого спектра сплавов с алюминием. Также большое значение кремний имеет в химической промышленности для производства силиконов; применяется в электронной промышленности и солнечной энергетике (при производстве солнечных панелей, кремниевых чипов, полупроводников). Произведенные на основе кремния материалы находят широкое применение и в других отраслях промышленности: строительстве, компьютерной технике, производстве кремнийорганических соединений и оптоволоконных изделий, в черной металлургии и др. [1–7].

В промышленности технический (термин согласно ГОСТ 2169-69[4]) кремний производят карботермическим способом при плавке шихты, включающей кварц, древесный уголь, щепу, длиннопламенный низкозольный уголь, нефтекокс и другие углеродистые восстановители. Плавка производится в рудотермических печах с погруженными в шихту электродами. Температура около подины печи в подэлектродной области достигает 2000–2200 °C [1, 2].

При производстве технического кремния возникают нарушения, связанные с накоплением шлака в плавильной ванне [8]. Содержание оксида кремния в шлаке при этом достигает 50–70%. В нормальном режиме работы шлаки формируются из примесей, содержащихся в кварцевом сырье и золе углеродистых восстановителей. Однако при нарушении работы печи (неправильная работа на колошнике, недостаток восстановителя, некорректный электрический режим плавки и т.д.) возможно ошлакование частично расплавленной неоднородной магматической массой, включающей оплавленный кварц, частички непрореагировавшего восстановителя и т.д.

Пример такой массы, накапливающейся в плавильной ванне, представлен на рис. 1. Аналогичная проблема возникает не только при выплавке технического кремния, но и при выплавке ферросилиция, феррохрома и других сплавов. Имеются работы, в которых для быстрого шлакоудаления и восстановления нормальной работы печи используют единовременную подачу флюсов, содержащих оксид бора[5] [9–12].

Флюс обеспечивает разжижение шлака и быстрый его выпуск из печи. Для обеспечения возможности такой технологической операции при выплавке технического кремния важно изучать свойства шлаков, характерных для производства технического кремния в нормальном режиме работы и при отклонении от нормы. В том числе с добавкой флюсующих компонентов, которые помогают решать поставленные задачи.

[4]ГОСТ 2169-69. Кремний технический. Технические условия. Введ. 01.07.1970 (с изм.). М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001.

[5]Ефимец А.М. Разработка и промышленное освоение электротермического способа производства ферросилиция с использованием боратовых руд: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02. Караганда, 2003. 116 с.

Рис. 1. *Магматическая масса, приводящая к ошлакованию плавильной ванны при выплавке технического кремния в рудотермических печах [8]*
Fig. 1. *Magmatic mass causing smelting cell slagging when smelting technical silicon in ore-thermal furnaces [8]*

Имеется много работ в этом направлении [13–15]. Не менее важно рассматривать процессы шлакообразования в плане возможности дальнейшей утилизации отвальных шлаков. Эти вопросы рассматриваются также в специализированных литературных источниках [16, 17].

Для разжижения шлака в качестве борсодержащего флюса часто используется колеманитовая руда [10]. Колеманит $Ca_2B_6O_{11}{\cdot}5H_2O$ или $CaB_3O_4(OH)_3{\cdot}H_2O$ – это боратный минерал, обнаруженный в эвапоритовых отложениях щелочной озерной среды. Колеманит – вторичный минерал, который образуется при изменении буры и улексита. Однако борсодержащие флюсы способствуют загрязнению готовой продукции бором, который является вредной примесью для кремния ввиду ограничения его применения в некоторых областях (в частности в солнечной энергетике). Поэтому расход флюса, с одной стороны, должен быть минимальным и достаточным для удаления шлака из печи, с другой – восстановление бора из примесных оксидов должно быть максимально блокировано, чтобы получить кремний с наименьшим содержанием данного примесного элемента.

Поскольку шлак на выпуске из печи в случаях нарушения нормальной работы печи образуется в больших количествах и выходит из печи в первую очередь, то имеется техническая возможность произвести его отсечку. Выпущенный из печи отдельно технический кремний можно рафинировать далее наведенным шлаком другого состава в окислительных условиях воздушной (воздушно-кислородной) продувки в рафинировочном ковше. В этой связи актуальным является раздельное изучение распределения бора между кремнием и шлаком в восстановительных (при восстановительной плавке) и окислительных (при продувке расплава воздухом в рафинировочном ковше) условиях.

Если обобщить все данные из вышеприведенных источников, то рационально иссле-

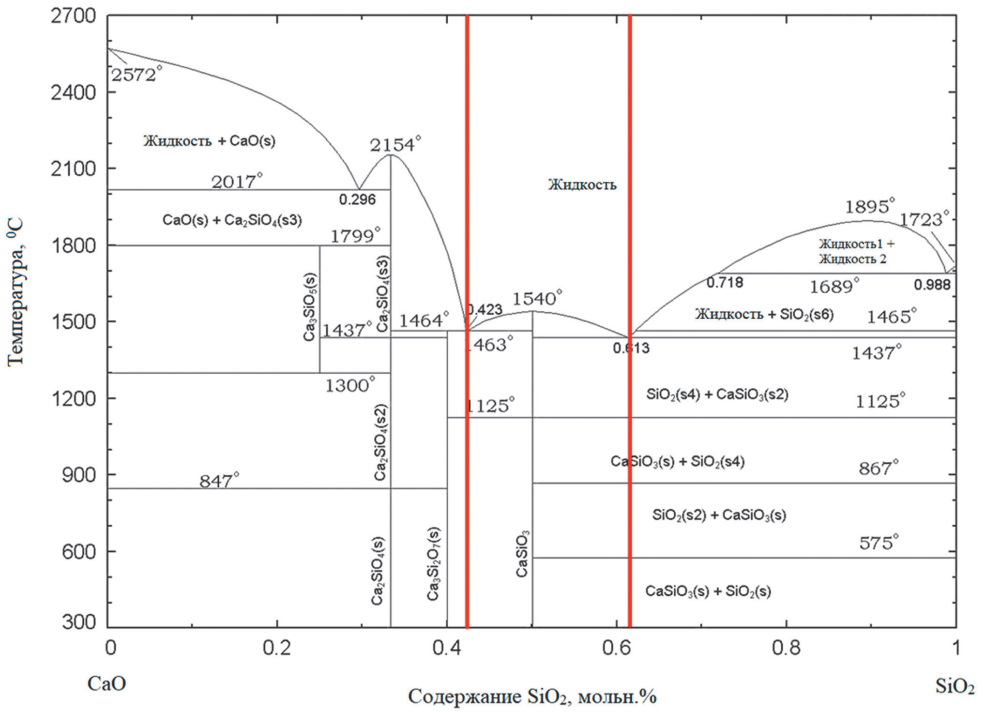


Рис. 2. *Фазовая диаграмма оксид кальция – оксид кремния (CaO-SiO$_2$) [18]*
Fig. 2. *Phase diagram of calcium oxide – silicon oxide (CaO-SiO$_2$) [18]*

довать распределение бора в шлаках распространенных систем $CaO-SiO_2$, $MgO-SiO_2$, $CaO-MgO-SiO_2$, $CaO-Al_2O_3-SiO_2$. На рис. 2 показана фазовая диаграмма наиболее важной для нашего случая системы $CaO-SiO_2$. Эта система важна, т.к. наиболее традиционным флюсом, применяемым для устранения ошлакования плавильной ванны при выплавке технического кремния, является оксид кальция. На рис. 2 выделена красными вертикальными линиями область наиболее низкоплавких эвтектик данной шлаковой системы, в которых проводились наши исследования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования были приготовлены модельные шлаки из оксидов с чистотой не менее 99%. Каждый шлак имел вес около 300 г и изготавливался путем плавления смеси оксидов в графитовом тигле индукционным нагревом под атмосферой аргона в печи марки IT-KTV-80/115/1650 компании Linn High Therm (Германия). Переплав шлака осуществлялся два раза, чтобы обеспечить однородный состав. Расплавы были закалены в водоохлаждаемой медной изложнице. Шлаки измельчались в порошок в дисковой мельнице с мелящими элементами из карбида вольфрама после первого плавления и дробились до 0,25 мм после второго плавления. Приблизительно 100–140 мг бора на 1 кг шлака добавляли в виде чистого B_2O_3 (99,98%) после первого плавления. Химический состав всех основных шлаков определялся методом рентгенофлюоресценции (XRF) на спектрометре последовательного рентгенофлюоресцентного анализа марки ARL PERFORM'X 1500W компании Thermo Scientific (США) и составлял как минимум 99,8% от общего содержания CaO, MgO, Al_2O_3 и SiO_2. Содержание около 0,1% Fe_2O_3 также измерялось, в то время как общее содержание других примесей было 0,1% или меньше. Промежуточные составы шлака были получены путем смешивания основных шлаков. Четыре партии модельного сплава кремния с бором, при содержании бора от 90 до 120 мг/кг, были получены добавлением бора чистотой 99,6% к чистому кремнию (99,2%). Сплавы бора и кремния плавились один раз индукционным нагревом в графитовом тигле под атмосферой аргона и закаливались так же, как и шлаки. Затем легированный бором кремний дробился в дисковой мельнице с мелящими элементами из карбида вольфрама до фракции размером от 0,125 до 2,0 мм.

Для моделирования восстановительных условий исследование процесса распределения бора между кремнием и шлаком проводилось в графитовых тиглях (внешний диаметр 40 мм, высота 54 мм и толщина стенок 4 мм). Тигель наполнялся 15 г модельного сплава кремния с бором и 15 г модельного шлака. Таким образом моделировали условия обильного шлакования плавильной ванны. Проведение процесса в графитовом тигле моделировало слабо восстановительную атмосферу подины печи: там, где нет твердого углерода-восстановителя, приходящего в печь с шихтой, присутствует газовая полость под электродом, а восстановительный потенциал обусловлен только наличием в прилегающем пространстве угольного электрода, который является источником небольшого количества твердого углерода. Затем тигель вставляли в графитовую трубчатую печь сопротивления марки 1200c, компании Ningbo VET Energy Technology Co., Ltd (фирмы Miami Advanced Material Technology Co., Китай) и нагревали от комнатной температуры до 1873 K (1600 °C) примерно за 15 мин под атмосферой аргона с чистотой 99,99%. Печь вакуумировали до остаточного давления менее 300 Па и трижды промывали газообразным аргоном перед началом нагрева. Поток аргона поддерживали примерно на уровне 5 л/ч в течение всего эксперимента. Печь выключали после достижения целевого времени выдержки и охлаждали до температуры плавления кремния в течение двух минут.

Еще через две минуты температура была на 150 °C ниже точки плавления кремния. Точное управление температурой достигалось с использованием двух термопар. Первая термопара размещалась прямо под тиглем и была подключена к регистратору температуры. Вторая термопара размещалась над тиглем и была подключена к терморегулятору. Калибровка регистратора температуры проверялась по сравнению с откалиброванным регистратором температуры, и значительных отклонений не обнаружено (менее 0,3 K (0,4 °C)). Использовались термопары типа B (Pt-6%Rh/Pt-30%Rh), кото-

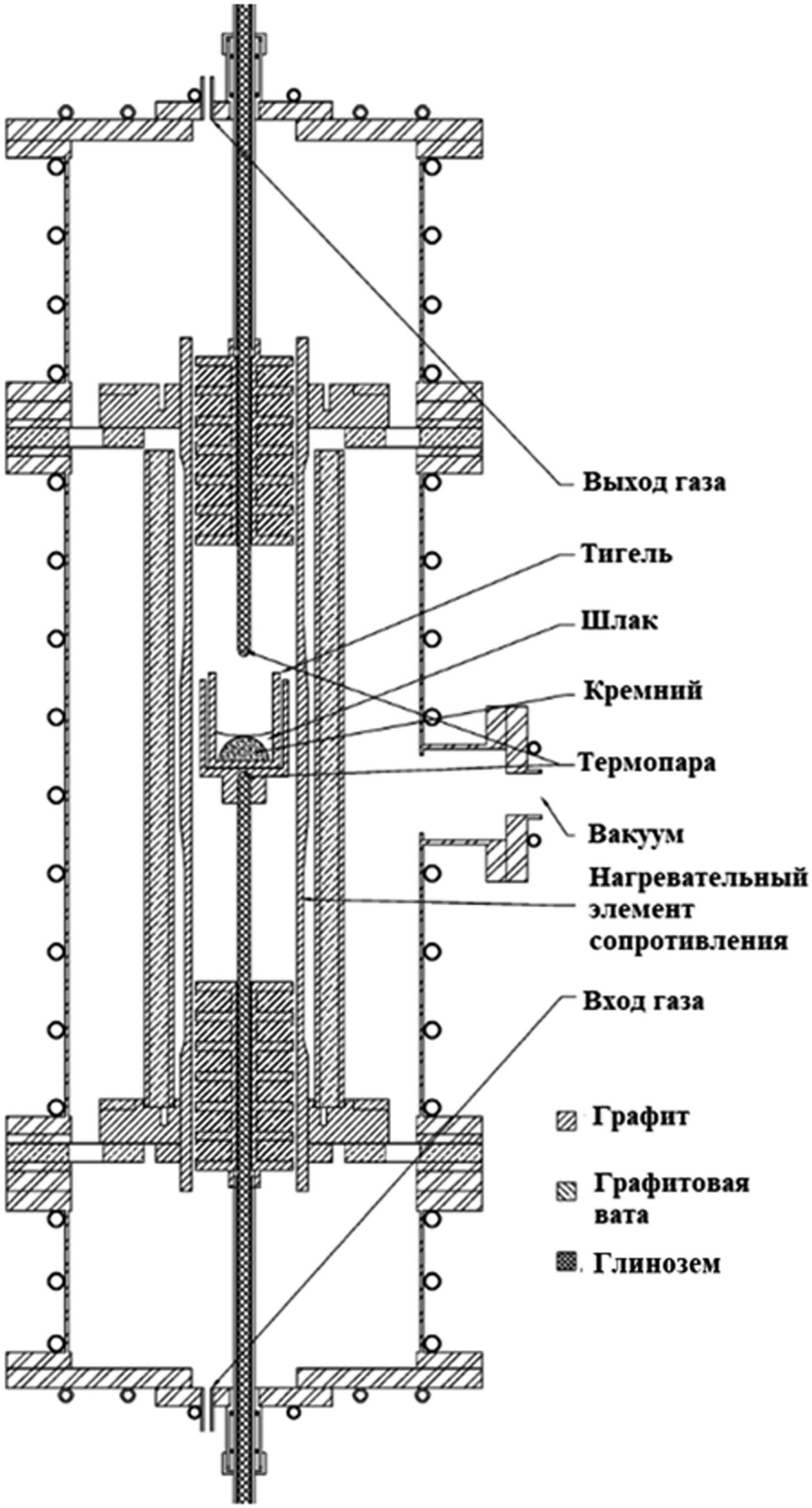


Рис. 3. *Схема экспериментальной установки для исследования распределения бора между кремнием и шлаком в восстановительных условиях*
Fig. 3. *Diagram of an experimental installation to study boron distribution between silicon and slag under reducing conditions*

рые калибровались по откалиброванной термопаре, и было замечено отклонение в 0,4 К (0,4 °С). Детальный чертеж печи показан на рис. 3 (установлена в лаборатории Карагандинского индустриального университета, г. Темиртау, Республика Казахстан).

Содержание бора в образцах шлака и кремния анализировалось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Для этих анализов использовался прибор марки Element 2 от компании Thermo Scientific (США). Графитовый тигель сначала полностью удаляли шлифовкой. Затем, шлак и кремний вручную разделяли между собой. Любой оставшийся на кремнии шлак и на шлаке кремний удаляли шлифовкой, после чего и шлак, и кремний очищали. Из тигля старались извлечь как можно больше шлака и кремня. После чистки использовались герметичные пластиковые пакеты и нитриловые перчатки, чтобы избежать загрязнения поверхности. Весь шлак и кремний, извлеченные из тигля, дробили отдельно в дисковой мельнице с мелящими элементами из карбида вольфрама, чтобы получить однородный порошок. Кремний дробили трижды для очистки мельничной камеры перед дроблением образцов кремния. Образцы шлака дробили после образцов кремния, и мельничную камеру чистили ацетоном между каждым дроблением как образцов кремния, так и образцов шлака.

Результаты эксперимента обрабатывались с помощью разработанной авторами (совместно с учеными из ИРНИТУ, Россия) компьютерной программы «Программа для расчета распределения бора между кремнием и шлаком в восстановительных условиях».

Все продукты плавки взвешивались, на основании чего производили расчет коэффициента распределения бора между кремнием и шлаком L_B, а также степень восстановления оксида кремния из шлака (R SiO_2). Коэффициент распределения бора (L_B) рассчитывали по формуле (1):

$$L_B = \frac{w_{(B)}}{w_{[B]}}, \quad (1)$$

где $w_{(B)}$ – содержание бора в шлаке, масс. %; $w_{[B]}$ – содержание бора в кремнии, масс. %.

Степень восстановления оксида кремния из шлака рассчитывали по формуле 2:

$$R_{SiO2} = \frac{O_{\text{газ } SiO2} \cdot 100\%}{O_{\text{шлак исх. } SiO2}}, \quad (2)$$

где $O_{\text{газ SiO2}}$ – количество кислорода, газифицированного из оксида кремния, содержащегося в модельном шлаке, за время выдержки, г; $O_{\text{шлак исх. SiO2}}$ – количество кислорода в составе оксида кремния, содержащегося в модельном шлаке в исходном состоянии.

Газифицированный кислород при восстановлении оксида кремния слагается из двух компонентов. Кислород, газифицированный при реакции восстановления оксида кремния до элементарного состояния $(O_{\text{газ}})1$, и кислород, газифицированный при реакции восстановления оксида кремния до монооксида кремния $(O_{\text{газ}})2$. Первый компонент рассчитывается по формуле (3):

$$(O_{\text{газ}})1 = \frac{(G_{Si\ \text{нач}} - G_{Si\ \text{кон}}) \cdot 32}{28}, \quad (3)$$

где $G_{Si\ \text{нач}}$, $G_{Si\ \text{кон}}$ – масса кремния в начале и в конце выдержки, г; 32, 28 – вес кислорода и кремния в составе молекулярного веса оксида кремния, г/моль.

Второй компонент рассчитывается по формуле (4):

$$(O_{\text{газ}})2 = \frac{Si^{SiO} \cdot 16}{28}, \quad (4)$$

где Si^{SiO} – количество кремния в составе монооксида кремния, образовавшегося в результате восстановления оксида кремния из модельного шлака в ходе выдержки, г; 16, 28 – вес кислорода и кремния в составе молекулярного веса монооксида кремния, г/моль. В свою очередь Si^{SiO} рассчитывается по формуле (5):

$$Si^{SiO} = \sum Si^{\text{восст}} - (G^{Si}_{\text{нач}} - G^{Si}_{\text{кон}}), \quad (5)$$

где $\sum Si^{\text{восст.}}$ – суммарное количество кремния, восстановленного в ходе выдержки до элементарного состояния и монооксида из модельного шлака, г.

Здесь для расчета $\sum Si^{\text{восст.}}$ используем формулу (6):

$$\sum Si^{\text{восст}} = \frac{\Delta SiO_2 \cdot 28}{60}, \quad (6)$$

где ΔSiO_2 – изменение веса оксида кремния в модельном шлаке в процессе выдержки,

г; 60, 28 – молекулярный вес оксида кремния и кремния в составе оксида кремния, г/моль.

Расчет изменения веса оксида кремния в модельном шлаке в процессе выдержки ведем по формуле (7):

$$\Delta SiO_2 = \frac{SiO_2^{\text{нач.}} \cdot G_{\text{шл.}}^{\text{нач.}} - SiO_2^{\text{кон.}} \cdot G_{\text{шл.}}^{\text{кон.}}}{100}, \quad (7)$$

где $SiO_2^{нач.}$, $SiO_2^{кон.}$ – начальное и конечное содержание оксида кремния в модельном шлаке, масс. %; $G^{нач.}_{шл.}$, $G^{кон.}_{шл}$ – начальный и конечный вес модельного шлака, масс. %.

Количество кислорода в составе оксида кремния, содержащегося в модельном шлаке в исходном состоянии, рассчитываем по формуле (8):

$$O_{\text{шлак исх. } SiO2} = \frac{SiO_2^{\text{нач.}} \cdot G_{\text{шл.}}^{\text{нач.}} \cdot 32}{60 \cdot 100}. \quad (8)$$

Для всех экспериментов рассчитывалась балансовая разница между приходом бора с исходными материалами (кремний и модельный шлак до выдержки) и расходом бора с продуктами выдержки. Во всех случаях невязка баланса по бору составляла не более ±5%. Из этого можно заключить, что эксперименты проведены с достаточной степенью чистоты и достоверности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенного исследования представлены в табл. 1–3.

На основании данных, полученных в первой серии экспериментов, установлена зависимость коэффициента распределения бора между кремнием и шлаком от времени выдержки, а также кривая реакции восстановления кремния из шлака в процессе распределения бора между кремнием металлом и шлаком системы $CaO\text{-}SiO_2$, представленных на рис. 4–5.

Как видно из результатов, представленных в табл. 1 и на рис. 4–5, при слабо развивающемся процессе восстановления кремния из шлака в кремний и в газовую фазу с интенсивностью около 1,5% газифицируемого кислорода в час, происходит переход бора из кремния в относительно чистый по содержанию бора шлак. Равновесное состояние достигается при коэффициенте распределения бора около 2,7 в течение 6 ч.

Таблица 1. Результаты исследования распределения бора между кремнием и шлаками систем $CaO\text{-}SiO_2$ и сопутствующего восстановления кремния из оксида кремния
Table 1. Results of studying boron distribution between silicon and $CaO\text{-}SiO_2$ system slags and silicon concomitant reduction from silicon oxide

Время выдержки, ч	Содержание в модельном шлаке, %		Содержание в шлаке после выдержки, %		Содержание бора, мг/кг		Коэффициент распределения бора $L_в$
	SiO_2	CaO	SiO_2	CaO	в шлаке	в Si	
0	62,7	37,3	62,7	37,3	2,8	120,8	0,023
0,6	63,5	36,5	59,7	40,3	22,8	101,5	0,225
3	62	38	56,1	43,9	79,8	43,7	1,826
6	60,1	39,9	52,9	47,1	96,8	37,1	2,609
9	57,2	42,8	45,8	54,2	101,8	36,4	2,797
6	62,8	37,2	56,7	43,3	98,9	36,7	2,695

Масса, г		Балансовая разница веса бора		Основность шлака		R SiO_2, %	Восстановлено SiO_2, г
кремния	шлака	мг	%	до выдержки	после выдержки		
15	15	0	0,00	0,59	0,59	0,00	0
15,1	14,9	0,01837	0,99	0,57	0,68	4,49	0,6297
15,4	14,4	-0,0319	-1,72	0,61	0,78	11,05	1,2216
15,3	14	0,06883	3,71	0,66	0,89	11,97	1,6090
15,2	12,9	0,0125	0,67	0,75	1,18	16,48	2,6718
15,3	13,8	0,07233	3,90	0,59	0,76	11,90	1,5954

Таблица 2. Результаты исследования распределения бора между кремнием и шлаками систем MgO-SiO_2 и сопутствующего восстановления оксида кремния
Table 2. Results of studying boron distribution between silicon and MgO-SiO_2 system slags and silicon concomitant reduction from silicon oxide

Время выдержки, ч	Содержание в модельном шлаке, %		Содержание в шлаке после выдержки, %		Содержание бора, мг/кг		Коэффициент распределения бора L_B
	SiO_2	CaO	SiO_2	CaO	в шлаке	в Si	
0	66,8	33,2	62,7	37,3	70,2	100,5	0,699
1	65,1	34,9	59,7	40,3	73,1	93,2	0,784
2	64,2	35,8	56,1	43,9	78,3	91,8	0,853
3	64,1	35,9	52,9	47,1	82,2	89,2	0,922
6	61,9	38,1	45,8	54,2	121,3	65,1	1,863
9	60,9	39,1	56,7	43,3	130,1	50,7	2,566
6	60,5	39,5	56,5	43,5	111,8	62,8	1,780
6	61,1	38,9	58,8	41,2	121,7	55,8	2,181
12	62,7	37,3	59,2	40,8	152,1	55,7	2,731

Масса, г		Балансовая разница веса бора		Основность шлака		R SiO_2, %	Восстановлено SiO_2, г
кремния	шлака	мг	%	до выдержки	после выдержки		
15	15	0	0,00	0,50	0,59	3,07	0,615
15,1	14,9	-0,064	-2,50	0,54	0,68	5,41	0,8697
15,4	14,4	-0,0193	-0,75	0,56	0,78	12,02	1,5516
15,3	14,1	-0,0367	-1,43	0,56	0,89	13,97	2,1561
15,2	14,2	0,15148	5,92	0,62	1,18	16,02	2,7814
15,3	11,3	-0,3147	-12,29	0,64	0,76	16,82	2,7279
15,2	12,1	-0,2532	-9,89	0,65	0,77	13,31	2,2385
15,1	11,9	-0,2697	-10,53	0,64	0,70	11,89	2,1678
15,4	9,2	-0,3034	-11,85	0,59	0,69	24,03	3,9586

При этом фактор основности шлака меняется в течение выдержки в силу уменьшения содержания оксида кремния по причине восстановления кремния до элементарного состояния и в большей мере до монооксида кремния.

Поэтому очень сложно оценивать влияние фактора основности на распределение бора, т.к. основность меняется во времени неконтролируемым образом и невозможно удерживать под контролем данный процесс. В этой связи мы можем говорить только о диапазоне основности, в котором происходит распределение бора между кремнием и шлаком. Важно понимать, что в плавильной ванне печи время контактирования кремния и шлака ограничено временем накопления продуктов плавки между выпусками из печи. В нормальном режиме это составляет 1,0–1,5 ч. На основании данных, полученных во второй серии экспериментов, установлена зависимость коэффициента распределения бора между кремнием и шлаком от времени выдержки, а также получена кривая зависимости восстановления кремния из шлака в процессе распределения бора между техническим кремнием и шлаком системы MgO-SiO_2, представленных на рис. 6–7.

При сопоставлении результатов первой и второй серии экспериментов можно сделать

Таблица 3. Результаты исследования распределения бора между кремнием и шлаками тройной системы $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ и сопутствующего восстановления кремния из оксида кремния
Table 3. Results of studying boron distribution between silicon and the triple $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ system slags and silicon concomitant reduction from silicon oxide

Содержание в модельном шлаке, масс. %			**Содержание в шлаке после выдержки, масс. %**			**Содержание бора, мг/кг**		**Коэффициент распределения бора L_B**
SiO_2	CaO	Al_2O_3	SiO_2	CaO	Al_2O_3	в шлаке	в Si	
38,7	49,6	11,7	35	50,5	14,5	70,2	31,2	2,250
24,9	51,7	23,4	22	52,3	25,7	58,8	42,9	1,371
9,3	50,4	40,3	8,2	52,7	39,1	49,9	53	0,942
56,4	36,1	7,5	48,1	39,7	12,2	70,8	31,1	2,277
37,4	35,5	27,1	27	39,1	33,9	53,8	45,7	1,177

Масса, г		**Балансовая разница веса бора**		**Основность шлака**		**R SiO_2, %**	**Восстановлено SiO_2, г**
кремния	шлака	мг	%	до выдержки	после выдержки		
15,1	15	0	0,00	0,98	1,02	4,78	0,555
15,1	14,9	-0,00021	-0,01	1,07	1,10	3,94	0,457
15,1	14,4	-0,00526	-0,35	1,02	1,11	1,84	0,2142
15,8	14,5	-0,00614	-0,40	0,56	0,66	25,23	1,4291
15,9	14,8	-0,00125	-0,08	0,55	0,64	28,67	1,614

вывод, что нет принципиальных отличий в закономерностях процессов восстановления кремния и распределения бора между кремнием и шлаковыми системами $CaO-SiO_2$, $MgO-SiO_2$ за исключением того, что в системе $MgO-SiO_2$ достижение равновесия не выражено так явно. Равновесие в случае с системой $MgO-SiO_2$ достигается при времени выдержки более 12 ч. Был проведен единичный эксперимент по изучению распределения бора между кремнием и шлаком в тройной системе $CaO-MgO-SiO_2$. Результат этого

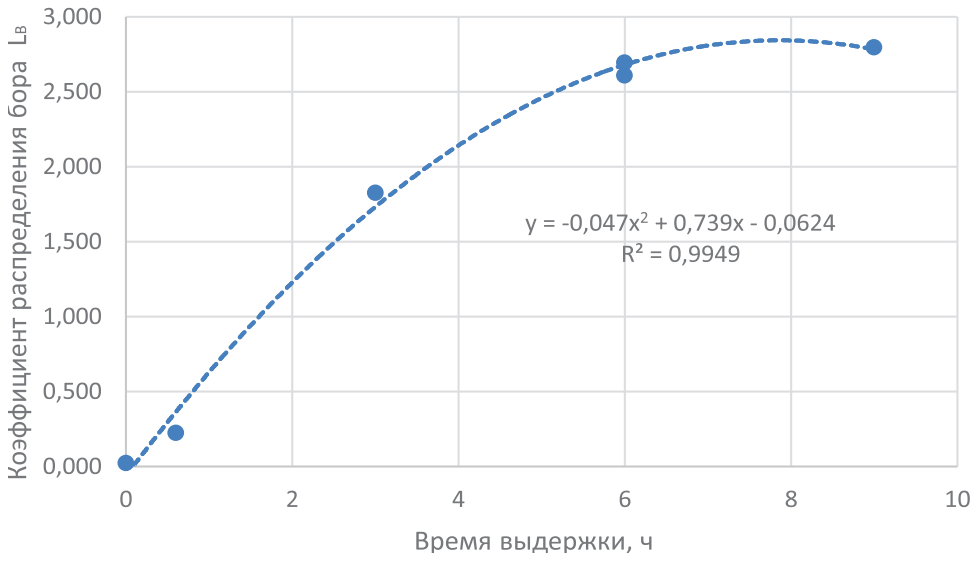


Рис. 4. *Зависимость коэффициента распределения бора между кремнием и шлаком системы $CaO-SiO_2$ в восстановительных условиях от времени выдержки*
Fig. 4. *Dependence of the boron distribution coefficient between silicon and $CaO-SiO_2$ system slags under reducing conditions on exposure time*

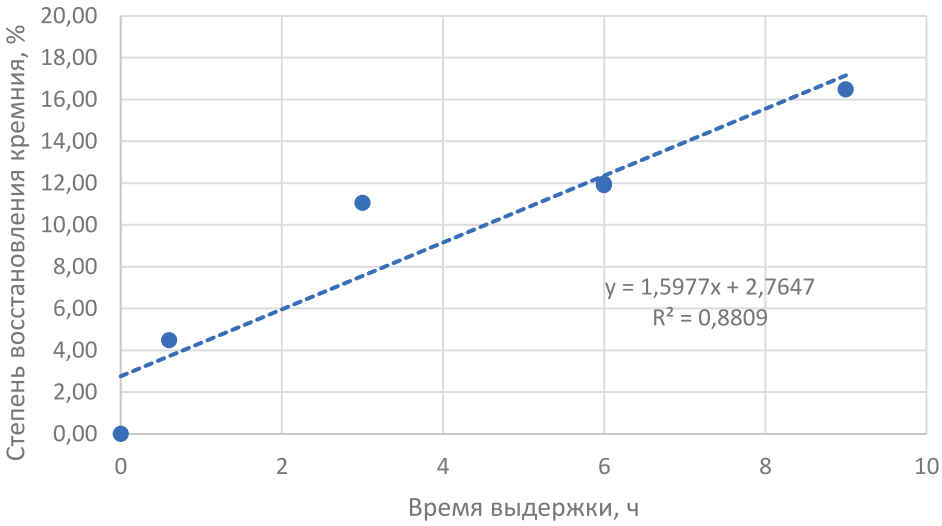


Рис. 5. *Зависимость степени восстановления кремния из шлака системы CaO-SiO_2 от времени выдержки*
Fig. 5. *Dependence of the degree of silicon reduction from CaO-SiO_2 system slag on exposure time*

опыта полностью укладывается в тенденции, выявленные для двойных систем. В этой связи было решено ограничится при изучении вопроса в тройной системе результатами данного единичного опыта.

На завершающем этапе исследований было изучено распределение бора между кремнием и шлаком трехкомпонентной системы CaO-Al_2O_3-SiO_2. На этот раз мы не стали изучать влияние времени выдержки на показатели процесса, приняв за основу то, что равновесие между кремнием и шлаком достигается примерно за 6–9 ч. В этой связи было принято во всех экспериментах время выдержки 8 ч. Изменяли содержание оксида алюминия в шлаке, т.к. этот оксид является амфотерным и, по нашему мнению, мог повлиять как на распределение бора, так и на восстановление кремния из шлака. На основании полученных данных установлены закономерности, представленные на рис. 8–9. Как видно из полученных зависимостей, имеется хорошая корреляция между содержанием оксида алюминия в шлаке системы CaO-Al_2O_3-SiO_2 и коэффициентом распределения бора между кремнием и шлаком. Также следует отметить, что оксид алюминия негативно влияет на удаление бора из кремния в шлак.

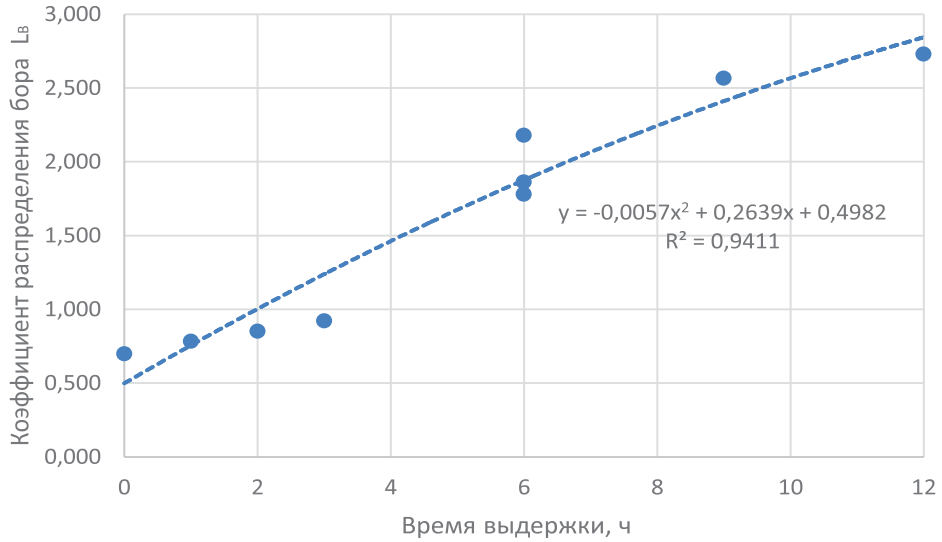


Рис. 6. *Зависимость коэффициента распределения бора между кремнием и шлаком системы MgO-SiO_2 в восстановительных условиях от времени выдержки*
Fig. 6. *Dependence of the boron distribution coefficient between silicon and MgO-SiO_2 system slag under reducing conditions on exposure time*

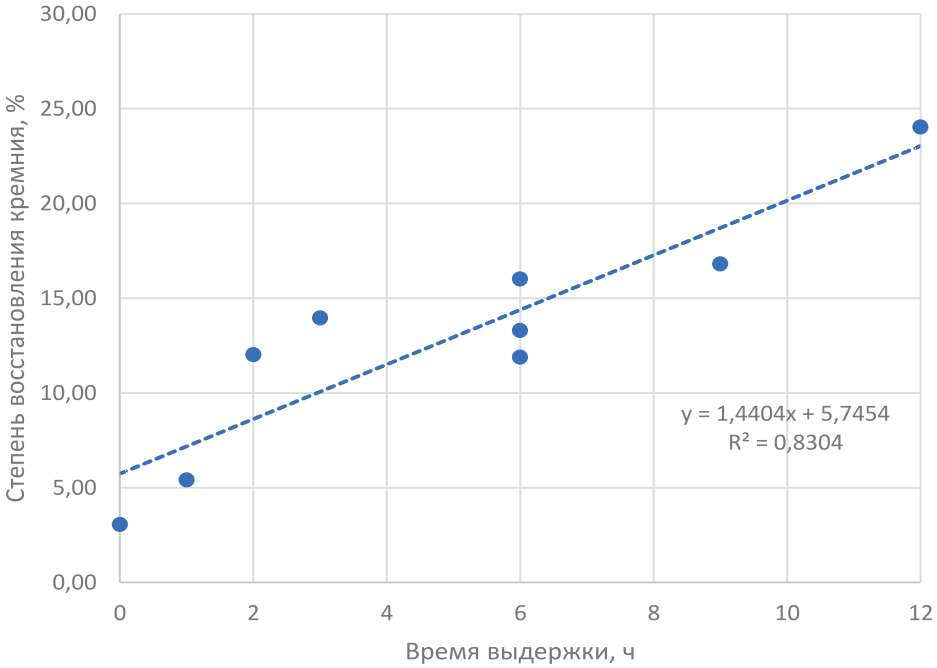


Рис. 7. *Зависимость степени восстановления кремния из шлака системы $MgO-SiO_2$ от времени выдержки*
Fig. 7. *Dependence of the degree of silicon reduction from $MgO-SiO_2$ system slag on exposure time*

В этой связи следует контролировать и стараться не допускать наличия оксида алюминия в борсодержащих флюсах с целью сокращения перехода бора в кремний в процессе рудотермической плавки. Какой-либо корреляции между содержанием оксида алюминия в шлаке и степенью восстановления кремния из оксида кремния как компонента шлака нет. Однако хорошая корреляция существует между основностью и степенью восстановления кремния. Величина достоверности аппроксимации велика – 0,9844. Этого достаточно, чтобы принимать данный факт во внимание при определении расхода и химического состава флюсов для выхода плавильной ванны из ситуации ошлакования. Нужно стремиться к тому, чтобы не повышать основность при

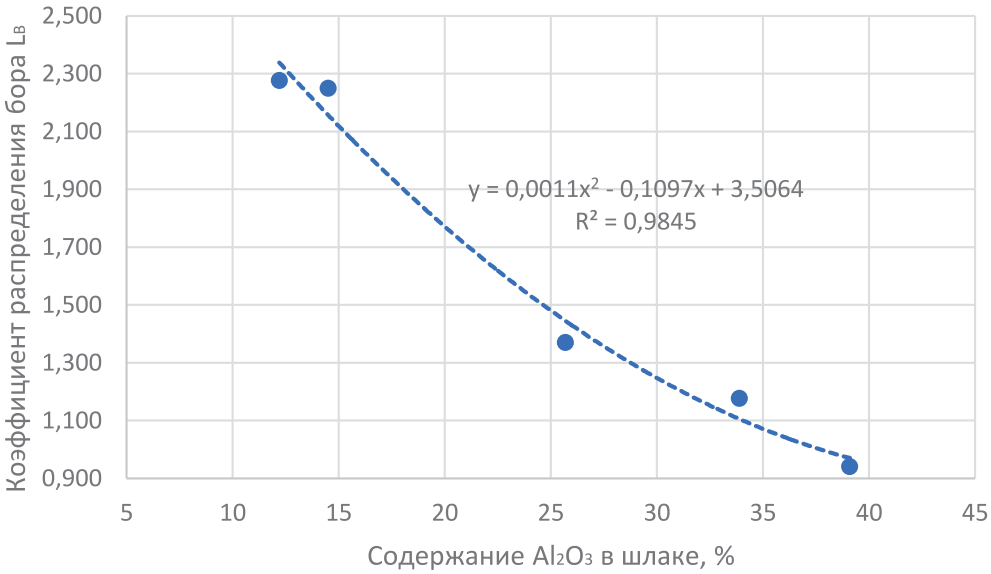


Рис. 8. *Зависимость коэффициента распределения бора между кремнием и шлаком системы $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ LB в восстановительных условиях от содержания оксида алюминия в шлаке*
Fig. 8. *Dependence of the LB boron distribution coefficient between silicon and $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ system slag under reducing conditions on the aluminum oxide content in the slag*

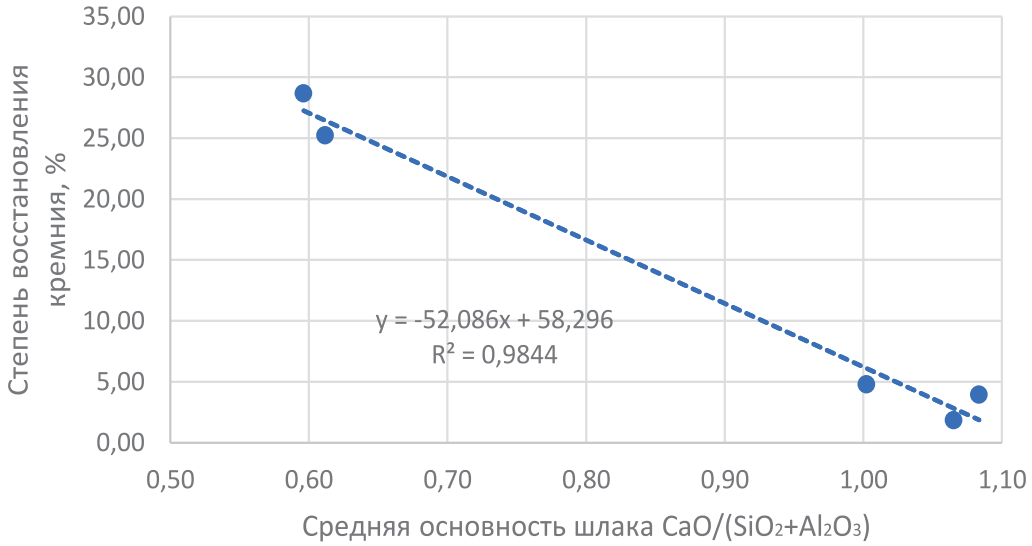


Рис. 9. *Зависимость степени восстановления кремния из шлака от основности шлака системы $CaO-Al_2O_3-SiO_2$*
Fig. 9. *Dependence of the degree of silicon reduction from slag on the basicity of the $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ system slag*

шлакоудалении во избежание низкого извлечения кремния.

Если сопоставлять результаты, полученные в нашей работе, с аналогичными работами других авторов, то следует отметить следующее.

Л.А.В. Тейшейра и К. Морита [19] исследовали шлак с массовым отношением CaO/SiO_2, равным 1,21 с временем выдержки 1 ч. Они определили значение коэффициента распределения бора между кремнием и шлаком, которое составило 1,69, что немного ниже, чем в наших исследованиях. Величина коэффициента распределения бора также значительно ниже значения, найденного в их работе для той же композиции с временем выдержки 18 ч, что указывает на то, что равновесие не было достигнуто при времени выдержки 1 ч.

Значение коэффициента распределения бора, определенное в результате наших экспериментов, также выше, чем опубликованное в работе К. Сузуки, Т. Сугияма, К. Такано, Н. Сано [20]. Исследователь использовал в экспериментах как атмосферу аргона, так и атмосферу аргона, смешанного с 12,5% CO_2, но не обнаружил, что атмосфера каким-либо образом влияет на коэффициент распределения бора.

Дж.Ф. Вайт с соавторами [21] выдерживали шлаки $CaO-MgO-SiO_2$ с кремнием под действием угарного газа при атмосферном давлении. В экспериментах Вайта время выдержки составляло 48 ч при 1873 K (1600 °C). Результаты, полученные в наших экспериментах, относительно близки к результатам исследований данных авторов для аналогичных условий длительной выдержки в восстановительной среде. Отмечено, что у Вайта получены немного более высокие значения коэффициента распределения бора, чем в нашей работе, для шлаков с более высоким содержанием SiO_2. Содержание MgO в исследованных шлаках Вайта варьировалось от 1,0 до 14,3%.

Также другими авторами проводились исследования по определению коэффициента распределения бора между кремнием и трехкомпонентными шлаками $CaO-Al_2O_3-SiO_2$. Так, Фудживара с сотрудниками [22] изучал равновесное распределение бора в системе кремний – модельный шлак при 1873 K (1600 °C) в атмосфере аргона, используя в работе глиноземные тигли. Результаты нашей работы соответствуют тенденции, найденной в работе этого исследователя, где коэффициент распределения бора уменьшается с увеличением содержания Al_2O_3 в шлаке. Так, полученные нами зависимости согласуются с закономерностями распределения бора между кремнием и четырехкомпонентными шлаками системы $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ в исследовании М.Д. Джонстона и М. Барати [23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашей работе проведены экспериментальные исследования по изучению равновесного распределения бора в системе

кремний–шлак систем $CaO-SiO_2$, $MgO-SiO_2$, $CaO-MgO-SiO_2$, $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ в восстановительных условиях. Как установлено в ходе экспериментов, коэффициент распределения бора не зависит от состава шлака в двойных системах $CaO-SiO_2$ и $MgO-SiO_2$, а также в трехкомпонентной системе $CaO-MgO-SiO_2$. В нашей работе установлено, что значение коэффициента распределения лежит в диапазоне от 2 до 2,5 во всей жидкой области этих систем при 1873 K (1600°C). Коэффициент распределения уменьшается с увеличением содержания Al_2O_3 в трехкомпонентной системе $CaO-Al_2O_3-SiO_2$. Это уменьшение значения коэффициента распределения бора также согласуется с аналогичными исследованиями других авторов, проведенных ранее, в трехкомпонентной ($CaO-Al_2O_3-SiO_2$) и четырехкомпонентной ($CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$) системах. В отличие от проведенных ранее работ, было установлено отсутствие влияния оксида магния на распределение бора между кремнием и шлаком, что позволит исключить ограничения по содержанию данного компонента в борсодержащих флюсах. Также применение графитовых тиглей вместо глиноземных в процессе выдержки позволило более точно смоделировать процесс распределения бора при плавке шихты в рудотермической печи и, соответственно, более точно прогнозировать содержание бора в жидком кремниевом расплаве после выпуска.

Список источников

1. Schei A., Tuset J.K., Tveit H. Production of high silicon alloys. Trondheim: Tapir, 1998. 363 p.
2. Гасик М.И., Гасик М.М. Электротермия кремния. Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2011. 487 р.
3. Gasik M. Handbook of ferroalloys: theory and technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 536 p.
4. Sun Kaidi, Wang Tongtong, Gong Weibo, Lu Wenyang, He Xin, Eddings E.G., Fan M., et al. Synthesis and potential applications of silicon carbide nanomaterials / nanocomposites // Ceramics International. 2022. Vol. 48. Iss. 22. P. 32571–32587. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.204.
5. Henstock J.R., Canham L.T., Anderson S.I. Silicon: the evolution of its use in biomaterials // Acta Biomaterialia. 2015. Vol. 11. P. 17–26. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.09.025.
6. Наумов А. Рынок поликристаллического кремния: состояние и перспективы // Электроника: наука, технология, бизнес. 2015. № 9. С. 94–98. EDN: SVLEPS.
7. Dazhou Ya. Siemens process // Handbook of Photovoltaic Silicon / eds. Deren Yang. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017. P. 1–32. https://doi.org/10.1007/978-3-662-52735-1_4-1.
8. Zobnin N.N., Baisanov S.O., Baisanov A.S., Musin A.M. Effect of silicon oxide reduction operational aspects on material and heat flow ratio in ore-thermal furnace // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. 444–459. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-444-459.
9. Ilin A.A., Zobnin N.N., Pikalova I.A., Nemchinova N.V. Distribution of iron and boron between silicon metal smelting products in industrial saf using borate fluxes // Silicon. 2024. https://doi.org/10.1007/s12633-024-02895-z.
10. Ким А.С. Особенности выплавки ферросплавов с использованием боратовых руд // Сталь. 2008. № 8. С. 55–58. EDN: JUWNUZ.
11. Ефимец А.М., Акбердин А.А., Ким А.С. Разработка и промышленное освоение технологии производства ферросилиция в руднотермических печах на борсодержащих шлаках // Труды Карагандинского государственного университета. 1999. Вып. 5. С. 65–68.
12. Акбердин А.А., Ким А.С., Султангазиев Р.Б. Исследование кинетики взаимодействия карбида кремния с расплавленным шлаком производств ферросилиция // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 9. С. 191–200. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-9-191-200. EDN: ZIVWHV.
13. Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Хоанг В.В., Жидков К.И. Шлаки кремниевого производства // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 11. https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3. EDN: ZNLKJP.
14. Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Бузикова Т.А. Исследование шлаков пирометаллургии кремния // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технология. 2015. Т. 8. № 4. С. 457–467. EDN: TZJUXX.
15. Немчинова Н.В., Бузикова Т.А. Исследование фазово-химического состава печных шлаков кремниевого производства // Известия вузов. Цветная металлургия. 2017. № 1. С. 31–39. https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-31-39. EDN: XWTXUH.
16. Немчинова Н.В., Хоанг В.В., Апончук И.И. Изучение химического состава рафинировочных шлаков кремниевого производства 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.
17. Хоанг В.В., Тютрин А.А., Евсеев Н.В. Обзор методов переработки шлаков кремниевого производства // Молодежный вестник Иркутского государственного технического университета. 2022. Т. 12. № 1. С. 35–40. EDN: IARKKE.
18. Mills K. Slag atlas. 2nd ed. Dusseldorf: Verein Deutscher Eisenhüttenleute, 2008. P. 349–401.

19. Teixeira L.A.V., Morita K. Removal of boron from molten silicon using CaO–SiO_2 based slags // ISIJ International. 2009. Vol. 49. Iss. 6. P. 783–787. https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.783.
20. Suzuki K., Sugiyama T., Takano K., Sano N. Thermodynamics for removal of boron from metallurgical silicon by flux treatment // Journal of the Japan Institute of Metals. 1990. Vol. 54. Iss. 2. P. 168–172.
21. White J.F., Allertz C., Sichen D. The thermodynamics of boron extraction from liquid silicon using SiO_2–CaO –MgO slag treatment // International Journal of Materials Research. 2013. Vol. 104. Iss. 3. P. 229–234. https://doi.org/10.3139/146.110867.
22. Fujiwara H., Yuan L.J., Miyata K., Ichise E., Otsuka R. Distribution equilibria of the metallic elements and boron between Si based liquid alloys and CaO-Al_2O_3-SiO_2 fluxes // Journal of the Japan Institute of Metals. 1996. Vol. 60. Iss. 1. P. 65–71.
23. Johnston M.D., Barati M. Distribution of impurity elements in slag–silicon equilibria for oxidative refining of metallurgical silicon for solar cell applications // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2010. Vol. 94. Iss. 12. P. 2085–2090.

References

1. Schei A., Tuset J.K., Tveit H. *Production of high silicon alloys*. Trondheim: Tapir; 1998, 363 p.
2. Gasik M.I., Gasik M.M. *Electrothermy of silicon*. Dnepropetrovsk: National Metallurgical Academy of Ukraine; 2011, 487 p. (In Russ.).
3. Gasik M. *Handbook of ferroalloys: theory and technology*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 536 p.
4. Sun Kaidi, Wang Tongtong, Gong Weibo, Lu Wenyang, He Xin, Eddings E.G., Fan M., et al. Synthesis and potential applications of silicon carbide nanomaterials / nanocomposites. *Ceramics International.* 2022;48(22):32571-32587. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.204.
5. Henstock J.R., Canham L.T., Anderson S.I. Silicon: the evolution of its use in biomaterials. *Acta Biomaterialia*. 2015;11:17-26. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.09.025.
6. Naumov A. Polycrystalline silicon market: state and prospects. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2015;9:94-98. (In Russ.). EDN: SVLEPS.
7. Dazhou Ya. Siemens process. In: Yang Deren. (eds.). *Handbook of Photovoltaic Silicon*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2017, p. 1-32. https://doi.org/10.1007/978-3-662-52735-1_4-1.
8. Zobnin N.N., Baisanov S.O., Baisanov A.S., Musin A.M. Effect of silicon oxide reduction operational aspects on material and heat flow ratio in ore-thermal furnace. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(2):444-459. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-444-459.
9. Ilin A.A., Zobnin N.N., Pikalova I.A., Nemchinova N.V. Distribution of iron and boron between silicon metal smelting products in industrial saf using borate fluxes. *Silicon*. 2024. https://doi.org/10.1007/s12633-024-02895-z.
10. Kim A.S. Smelting ferroalloys by means of borate ores. *Stal'*. 2008;8:55-58. (In Russ.). EDN: JUWNUZ.
11. Efimec A.M., Akberdin A.A., Kim A.S. Development and industrial development of ferrosilicon production technology in ore-smelting furnaces using boron-containing slag. *Trudy universiteta Karagandinskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 1999;5:65-68. (In Russ.).
12. Akberdin A.A., Kim A.S., Sultangazyiev R.B. Study of interaction kinetics of silicon carbide and ferrosilicon production molten slag. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(9):191-200. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-9-191-200. EDN: ZIVWHV.
13. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Hoang V.V., Zhidkov K.I. Silicon production slags. *International Scientific Research Journal*. 2022;11. (In Russ.). https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3. EDN: ZNLKJP.
14. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Buzikova T.A. Investigation of pyrometallurgical silicon slags. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies.* 2015;8(4):457-467. (In Russ.). EDN: TZJUXX.
15. Nemchinova N.V., Buzikova T.A. Study of the phase-and-chemical composition of silicon production furnace slags. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2017;1:31-39. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-31-39. EDN: XWTXUH.
16. 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.
17. Hoang V.V., Tyutrin A.A., Evseev N.V. Review of methods for processing slags of silicon production. *Molodezhnyj vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2022;12(1):35-40. (In Russ.). EDN: IARKKE.
18. Mills K. *Slag atlas.* 2nd ed. Dusseldorf: Verein Deutscher Eisenhüttenleute; 2008, p. 349-401.
19. Teixeira L.A.V., Morita K. Removal of boron from molten silicon using CaO–SiO_2 based slags. *ISIJ International.* 2009;49(6):783-787. https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.783.
20. Suzuki K., Sugiyama T., Takano K., Sano N. Thermodynamics for removal of boron from metallurgical silicon by flux treatment. *Journal of the Japan Institute of Metals*. 1990;54(2):168-172.
21. White J.F., Allertz C., Sichen D. The thermodynamics of boron extraction from liquid silicon using SiO_2–CaO –MgO slag treatment. *International Journal of Materials Research*. 2013;104(3):229-234. https://doi.org/10.3139/146.110867.
22. Fujiwara H., Yuan L.J., Miyata K., Ichise E., Otsuka R. Distribution equilibria of the metallic elements and boron between Si based liquid alloys and CaO-Al_2O_3-SiO_2 fluxes. *Journal of the Japan Institute of Metals*. 1996;60(1):65-71.
23. Johnston M.D., Barati M. Distribution of impurity elements in slag–silicon equilibria for oxidative refining of metallurgical silicon for solar cell applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 2010;94(12):2085-2090.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ильин Александр Александрович,
научный сотрудник,
Карагандинский индустриальный университет,
101400, г. Темиртау, пр. Республики, 30,
Республика Казахстан
worldilyins@gmail.com
http://orcid.org/0009-0003-8167-9640

Пикалова Ирина Анатольевна,
старший преподаватель кафедры
«Металлургия и материаловедение»,
Карагандинский индустриальный университет,
101400, г. Темиртау, пр. Республики, 30,
Республика Казахстан
irina.p77.77@mail.ru

Зобнин Николай Николаевич,
к.т.н.,
старший преподаватель кафедры
«Металлургия и материаловедение»,
Карагандинский индустриальный университет,
101400, г. Темиртау, пр. Республики, 30,
Республика Казахстан
✉ zobninnn@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-8556-2971

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander A. Ilin,
Researcher,
Karaganda Industrial University,
30, Respubliki pr., Temirtau 101400,
Republic of Kazakhstan,
worldilyins@gmail.com
http://orcid.org/0009-0003-8167-9640

Irina A. Pikalova,
Senior Lecturer of the Metallurgy and Materials Science Department,
Karaganda Industrial University,
30, Respubliki pr., Temirtau 101400,
Republic of Kazakhstan,
irina.p77.77@mail.ru

Nikolay N. Zobnin,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Lecturer of the Metallurgy and Materials Science Department,
Karaganda Industrial University,
30, Respubliki pr., Temirtau 101400,
Republic of Kazakhstan,
✉ zobninnn@mail.ru
http://orcid.org/0000-0002-8556-2971

Вклад авторов

Ильин А.А. предложил идею для исследований, проводил эксперименты, обобщил полученные результаты, сделал выводы. Пикалова И.А. разрабатывала программу обработки экспериментальных данных, проводила подбор литературных источников по тематике и общее редактирование текста рукописи. Зобнин Н.Н. осуществлял руководство исследованиями, проводил эксперименты.

Contribution of the authors

Ilin A.A. proposed the idea for research, conducted experiments, summarized the results obtained, drew epy conclusions. Pikalova I.A. developed the program to process experimental data, selected literary sources on the research topic and performed general editing of the manuscript. Zobnin N.N. supervised the research and conducted experiments.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 02.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 06.05.2024 г.; принята к публикации 12.15.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 02.04.2024; approved after reviewing 06.05.2024; accepted for publication 12.15.2024.

iPolytech Journal 2024. Т. 28. № 2. С. 386-396 ISSN 2782-4004 (print)
2024;28(2):386-396 ISSN 2782-6341 (online)

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья
УДК 669.334.422
EDN: OPJCSF
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-386-396

Влияние параметров обжига на удаление мышьяка из пыли медеплавильного производства

С.В. Мамяченков[1], Д.И. Блудова[2]✉, Н.А. Ханжин[3]

[1-3]Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Резюме. Цель – разработка способа обжига сульфидных медь-мышьяксодержащих материалов для удаления мышьяка. Объектом исследования явились образцы «тонкой» пыли медеплавильного производства следующего состава, масс. %: 34,89 Zn; 20,02 Cu; 17,74 Pb; 17,07 Fe; 7,12 As; 0,92 Sb; 0,69 Sn; 0,63 Ca; 0,42 Mo; 0,34 K. Химический состав материалов анализировали с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра SHIMADZU EDX-7000, дифрактометра Bruker D8 Advance. Процесс обжига осуществляли в лабораторной трубчатой печи при температуре 550–800°C, продолжительности 60–120 мин, добавке в шихту FeS_2 в количестве 25–50%. В результате проведенных лабораторных экспериментов были определены условия процесса, при которых остаточное содержание токсичного мышьяка в огарках составило до 0,3 масс. %: температура – 750–800°C, продолжительность – 1,5–2,0 ч (в инертной атмосфере), содержание пиритного концентрата в шихте – 30 масс. % . При этом извлечение As в газовую фазу достигает 91–96%. Показано, что для снижения температуры обработки до 600°C необходимо добавить в смесь медеплавильной пыли с пиритом восстановитель (отсев кокса) либо повысить долю пирита в навеске до 50 масс. % и выдержать смесь в течение 1,5–2,0 ч (в инертной среде – атмосфере аргона и азота – или при недостатке кислорода в дутье). При этом извлечение As в газовую фазу составляет до 97%. Рентгеноспектральный анализ полученного осадка на охлаждаемых концах кварцевых трубок печи при выходе газов, образующихся в результате обжига, показал, что данный материал преимущественно (до 93%) состоит из мышьяка. Получаемый огарок на 94 масс. % представлен соединениями железа, цинка, меди и свинца. Таким образом, получаемый в результате обжига «тонких» пылей медеплавильного производства огарок пригоден для возврата в процесс производства меди.

Ключевые слова: медеплавильная пыль, удаление мышьяка, обжиг, возгонка, нейтральная среда

Для цитирования: Мамяченков С.В., Блудова Д.И., Ханжин Н.А. Влияние параметров обжига на удаление мышьяка из пыли медеплавильного производства // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 386–396. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-386-396. EDN: OPJCSF.

METALLURGY

Original article

Effect of roasting parameters on arsenic removal from copper smelting dust

Sergey V. Mamyachenkov[1], Dana I. Bludova[2]✉, Nikita A. Khanzhin[3]

[1-3]Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Abstract. In this study, we develop a roasting method for removing arsenic from sulfide copper-arsenic-containing materials. The object of the study was fine dust from copper smelting production of the following composition (wt%): 34.89 – Zn; 20.02 – Cu; 17.74 – Pb; 17.07 – Fe; 7.12 – As; 0.92 – Sb; 0.69 – Sn; 0.63 – Ca; 0.42 – Mo; and 0.34 – K. The chemical composition of the materials was analyzed using an SHIMADZU EDX-7000 energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer and a Bruker D8 Advance diffractometer. The roasting process was carried out in a laboratory tube furnace at a temperature of 550–800°C for 60–120 minutes with the addition of 25–50% of FeS_2 to the charge. Optimal conditions for reducing residual arsenic in the calcine to less than 0.3 wt% were identified: a temperature of 750–800°C, a duration of 1.5–2.0 h (in an inert atmosphere), and the use of 30 wt% of pyrite concentrate in the charge. Arsenic removal to the gas phase reached 91–96%. It is shown that in order to reduce the processing temperature to 600°C, it is necessary to add a reducing agent (coke fines) to the mixture of copper smelting dust with pyrite or increase the proportion of pyrite in the test charge to 50 wt% and hold the mixture for 1.5–2.0 h under inert atmosphere (argon and nitrogen) or low-oxygen blast. Arsenic removal to the gas

© Мамяченков С.В., Блудова Д.И., Ханжин Н.А., 2024

phase reached 97%. X-ray spectral analysis of the residue deposited on the cooled ends of quartz tubes following the release of gases formed during roasting revealed that this material is predominantly (up to 93%) composed of arsenic. The resulting calcine contained 94 wt% of iron, zinc, copper and lead compounds. Therefore, the calcine obtained during the roasting of fine dust from copper smelting production is suitable for returning to the copper production process.

***Keywords*:** copper smelting dust, arsenic removal, roasting, sublimation, neutral atmosphere
For citation: Mamyachenkov S.V., Bludova D.I., Khanzhin N.A. Effect of roasting parameters on arsenic removal from copper smelting dust. *iPolytech Journal.* 2024;28(2):386-396. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-386-396. EDN: OPJCSF.

ВВЕДЕНИЕ

Производство меди занимает лидирующие позиции во всем мире благодаря широкому применению данного металла в различных областях [1–3].

Проблема удаления мышьяка в процессе производства меди для предприятий стоит особенно остро [4, 5]. При пирометаллургической переработке медьсодержащих сульфидных руд и концентратов образуется значительное количество тонкодисперсных побочных продуктов, в том числе мышьяксодержащих пылей и кеков. Данные техногенные продукты благодаря высокой токсичности непригодны для длительного хранения, а для их захоронения требуются особые меры предосторожности. По предварительным оценкам, при переработке 1 млн т сульфидных медных и медно-цинковых концентратов поступление мышьяка на российские медеплавильные заводы составляет 2 тыс. т, что многократно превышает потребности в нем [6]. В таких условиях задача удаления мышьяка из отходов и промпродуктов медеплавильного производства и последующее захоронение мышьяка в виде стабильных соединений является актуальной [7].

Результаты распределения примесных элементов по продуктам переработки сульфидных медных концентратов по схеме, включающей автогенную плавку, конвертирование штейна и флотационное обеднение шлаков, данные о химических составах сырья на медеплавильных предприятиях и о формах нахождения мышьяка в концентрирующих его продуктах (пыль, шлам), позволяют сделать вывод, что пыли электрофильтров при производстве меди имеют повышенное (от 6,0 до 9,0%) содержание мышьяка[4] [7]. Всего в пылях концентрируется около 35-40% As из исходного сырья [9, 10], что связано с низкими температурами возгонки соединений этого полуметалла.

Сущность обжига, применяемого для удаления мышьяка из сложного многокомпонентного сырья[5] [11, 12], заключается в том, что в процессе термической обработки в трубчатой печи мышьяксодержащих материалов («тонкой» медеплавильной пыли совместно с пиритным концентратом) при 600–750°С в условиях недостатка кислорода присутствующие в концентратах мышьяковистые химические соединения подвергаются разложению. Полученные продукты реагируют с сернистым ангидридом, твердыми сульфидами Zn, Fe, Cu и Pb, в результате чего образуются летучие соединения мышьяка [14]. Указанные соединения отгоняются из рабочего пространства печи с помощью потока воздуха или инертного газа и конденсируются в виде порошкообразного твердого осадка. При этом кислород, участвующий в химических взаимодействиях, расходуется в основном на окисление железа и серы [15–17].

Целью проведения лабораторных исследований было определение оптимальных условий обжига «тонких» пылей медеплавильного производства для удаления из материала мышьяка в газовую фазу.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В лабораторных исследованиях использовалась «тонкая» пыль медеплавильного производства, полученная из электрофильтров, следующего элементного состава, масс. %: 34,89 Zn; 20,02 Cu; 17,74 Pb; 17,07 Fe; 7,12 As; 0,92 Sb; 0,69 Sn; 0,63 Ca; 0,42 Mo; 0,34 K.

Согласно данным рентгеноструктурного анализа пыли, основными фазами, в которых находится мышьяк, являются As_2O_3, As_2S_3;

[4]Новиков Д.О. Физико-химическое обоснование утилизации мышьяковистых кеков медно-цинкового производства: дис. ... канд. тех. наук: 05.16.02. Екатеринбург, 2021. 133 с.

[5]Масленицкий И.Н., Чугаев Л.В., Борбат В.Ф., Никитин М.В., Стрижко Л.С. Металлургия благородных металлов: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1987. 432 с.

цинксодержащие соединения представлены ZnO, ZnS, $ZnSO_4$; медь находится в виде CuO, CuS, $CuSO_4$, железо представлено соединениями FeO, FeS_2, $Fe_2(SO_4)_3$, свинец – фазой PbS.

Некондиционный пиритный концентрат, применяемый в экспериментах по обжигу техногенной пыли, имеет следующий химический состав, масс. %: 48,06 Fe; 21,11 S; 8,48 Cu; 6,50 As; 5,38 Si; 4,42 Pb; 2,12 Sb; 1,93 Zn; 1,41 Ca; 0,51 K.

Конечным продуктом операции обжига является порошкообразный огарок, содержащий сульфиды и оксиды металлов (цинка, железа, меди и свинца) с незначительным количеством соединений кальция и серы. Огарок представляет собой однородный материал от темно-коричневого до черного оттенка.

Химический состав исходной пыли и огарка после обжига анализировали с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра SHIMADZU EDX-7000 (Япония). Также был проведен рентгенофазовый анализ огарка на дифрактометре Bruker D8 Advance. Качественный фазовый анализ выполнялся с использованием пакета Bruker DiffracSuite EVA v6.0 и базы данных эталонных дифракционных спектров ICDD PDF-2 (v. 2019). Полуколичественный фазовый анализ проводился в пакете полнопрофильного анализа Bruker TOPAS 5.0 по методу Ритвельда; кристаллические структуры взяты из открытой базы данных Crystallography Open Database[6].

ОСНОВЫ ХИМИЗМА ПРОЦЕССА

При переработке пирометаллургическими методами сульфидных материалов имеет значение температура образования сульфатов, оксидов и сульфидов. Прежде всего, при температурах 450–500°С начинается процесс окисления сульфида железа с образованием пирротина как промежуточного продукта. Далее, FeS окисляется до магнетита, который в дальнейшем переходит в гематит:

$$FeS_2 + O_2\uparrow = FeS + SO_2\uparrow \quad (1)$$

$$3FeS + 5O_2\uparrow = Fe_3O_4 + 3SO_2\uparrow \quad (2)$$

$$4Fe_3O_4 + O_2\uparrow = 6Fe_2O_3 \quad (3)$$

При повышении температуры выше 600°С сульфид железа диссоциирует на пирротин и газообразную серу:

$$2FeS_2 = 2FeS + S_2\uparrow \quad (4)$$

При температуре обжига ниже 500°С скорость окислительных реакций невелика, и в огарке может присутствовать существенная доля неокисленных частиц FeS. Несмотря на то что окисление сульфидов протекает полнее с повышением температуры, при температурах выше 900–950°С происходит частичное оплавление огарка вследствие образования относительно легкоплавких эвтектических смесей. В результате этого материал спекается с получением плотных малопористых огарков, сложно поддающихся дальнейшей гидрометаллургической переработке [14, 15]. Это обстоятельство необходимо учитывать, если технологическая схема переработки сульфидных материалов после обжига предполагает последующую гидрометаллургическую стадию с выделением целевых металлов в раствор.

На показатели обжига также существенно влияет концентрация кислорода в газовой фазе. Так, при низком парциальном давлении кислорода скорость окисления FeS снижается, в то же время при чрезмерно высокой концентрации кислорода скорость процесса может увеличиться настолько, что при недостаточном теплообмене тепло экзотермических реакций не будет успевать рассеиваться в окружающем пространстве и температура частиц превысит предел 950°С, в результате чего они сплавляются и структура получившегося материала будет недостаточно пористой [16].

На практике установлено, что оптимальная температура обжига сульфидного материала зависит от его вещественного состава и колеблется в пределах 500–700°С. Согласно расчетам и экспериментальным исследованиям разных авторов, в случае перегрева навески ее температура может превышать температуру в печи на 300–400°С. Для получения пористого огарка необходимо понизить количество подаваемого в печь воздуха или снизить концентрацию кислорода в газовой фазе [17, 18]. Минимизировать

[6]Crystallography Open Database. Режим доступа: http://www.crystallography.net (дата обращения: 23.02.2024).

возможность перегрева частиц при обжиге можно, наладив теплообмен между смесью материалов при обжиге, что рациональнее сделать, например, осуществляя обжиг во вращающейся печи.

Поведение арсенопирита при окислительном обжиге во многом аналогично поведению пирита. Интенсивное окисление арсенопирита начинается при 450 °С и протекает с образованием пирротина, магнетита и оксида мышьяка (III) [14]:

$$2FeAsS + 1{,}5O_2\uparrow = 2FeS + As_2O_3\uparrow \quad (5)$$
$$3FeS + 5O_2\uparrow = Fe_3O_4 + 3SO_2\uparrow \quad (2)$$
$$2Fe_3O_4 + 0{,}5O_2\uparrow = 3Fe_2O_3 \quad (6)$$

При температурах выше 600 °С окислению арсенопирита предшествует его диссоциация с образованием пирротина по реакции (7):

$$4FeAsS = 4FeS + As_4\uparrow \quad (7)$$

Выделяющийся газообразный мышьяк окисляется до оксида (III) по реакции (8):

$$As_4\uparrow + 3O_2\uparrow = 2As_2O_3\uparrow \quad (8)$$

А пирротин окисляется до гематита.

Образующийся оксид мышьяка (III) обладает высокой летучестью. Так, при 457 °С упругость паров As_2O_3 составляет 0,1 МПа, поэтому мышьяк в виде оксида As_2O_3 переходит в газовую фазу.

Однако при избытке кислорода оксид мышьяка (III) может окислиться до оксида (V) [16]:

$$As_2O_3\uparrow + O_2\uparrow = As_2O_5 \quad (9)$$

В зависимости от условий обжига и вещественного состава обжигаемого материала оксид мышьяка (V) частично может оставаться в огарке в неизменном состоянии или вступать во взаимодействие с оксидами железа, образуя арсенаты железа (II) и (III): $Fe_3(AsO_4)_2$ и $FeAsO_4$. Так как пентоксид мышьяка и арсенаты железа нелетучи [19], мышьяк, окисленный до As (V), остается в огарке. Это нежелательно, т.к. при последующем выщелачивании огарка мышьяк будет переходить в раствор, что делает последующую гидрометаллургическую стадию переработки нецелесообразной [20]. Поэтому при обжиге пыли мышьяк необходимо переводить в газовую фазу, и при обжиге материала рекомендуется поддерживать слабоокислительную атмосферу, где высока вероятность образования летучего оксида As_2O_3.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОБЖИГУ ПЫЛИ

В начальной стадии исследования проводили опыты в потоке нейтрального газа (в качестве которых использовались аргон и азот) с добавкой пирита в количестве 30 масс. % в смесь с пылью в диапазоне рабочих температур 550–800 °С с шагом 50 °С. Продолжительность обработки составляла 90 мин.

В следующей серии опытов определяли влияние температуры обжига на удаление мышьяка в присутствии восстановителя в составе смеси материалов, для чего готовили навеску, состоящую из пыли, 30 масс. % пиритного концентрата и 30 масс. % отсевов кокса. Эксперименты по обжигу проводились аналогично предыдущим в потоке нейтрального газа, диапазон температур процесса составлял 550–800 °С с шагом 50 °С, продолжительность оставалась прежней.

В целях нахождения оптимальных условий процесса изменяли также величину продолжительности обжига, ее значение составляло 60, 90 и 120 мин.

Далее, проводили опыты с изменением доли пиритного (FeS_2) концентрата в навеске от 25 до 50 масс. % пыли и восстановителя в количестве от 20 до 30 масс. % пыли.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Варьирование отдельных параметров обжига смеси пыли с пиритом, и их влияние на удаление мышьяка из пыли показано в табл. 1.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЖИГА НА ИЗВЛЕЧЕНИЕ МЫШЬЯКА В ГАЗОВУЮ ФАЗУ

Температура обжига. На основе элементного анализа огарка, полученного при различных температурах обжига, определяли, как изменяются показатели извлечения мышьяка при нагреве смеси медеплавильной пыли и пирита в отсутствии и при наличии восстановителя.

Полученные данные позволяют сделать следующие выводы:

По мере изменения температуры процесса от 550 °С до 700 °С для отгонки мышьяка оказывается более эффективен обжиг смеси

Таблица 1. Влияние параметров обжига на величину извлечения мышьяка в газовую фазу
Table 1. Roasting parameters effect on maximum arsenic extraction into the gas phase

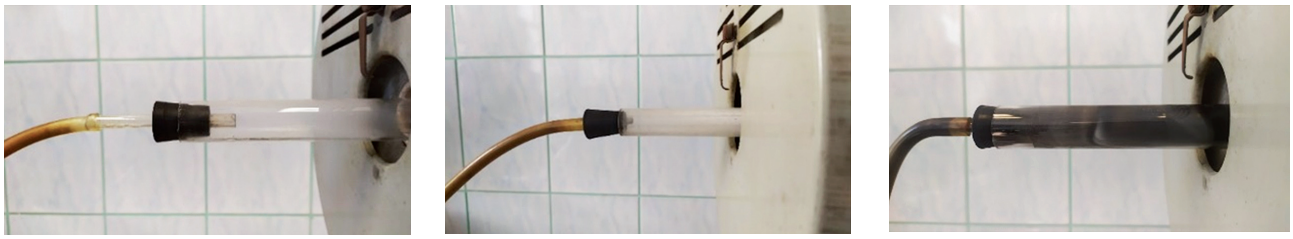
Температура, °С	Продолжительность, мин	Состав смеси	Остаточное содержание As в огарке, %	Извлечение As,%
Влияние температуры в отсутствие восстановителя				
550	90	Пыль + 30% FeS_2	4,06	46,97
600	90	Пыль + 30% FeS_2	2,19	72,11
650	90	Пыль + 30% FeS_2	2,64	66,13
700	90	Пыль + 30% FeS_2	2,95	62,85
750	90	Пыль + 30% FeS_2	0,30	96,42
800	90	Пыль + 30% FeS_2	0,40	95,11
Влияние температуры при добавке восстановителя				
550	90	Пыль + 30% FeS_2 + 30% С	2,40	60,67
600	90	Пыль + 30% FeS_2 + 30% С	0,68	89,30
650	90	Пыль + 30% FeS_2 + 30% С	1,09	82,90
700	90	Пыль + 30% FeS_2 + 30% С	1,44	77,55
750	90	Пыль + 30% FeS_2 + 30% С	1,02	84,38
800	90	Пыль + 30% FeS_2 + 30% С	1,23	81,17
850	90	Пыль + 30% FeS_2 + 30% С	0,30	97,00
Влияние продолжительности процесса				
700	60	Пыль + 30% FeS_2	4,62	40,95
700	90	Пыль + 30% FeS_2	2,95	62,85
750	90	Пыль + 30% FeS_2	0,30	96,42
750	120	Пыль + 30% FeS_2	0,72	90,93
Влияние доли пирита в навеске				
750	90	Пыль + 25% FeS_2	5,63	34,90
750	90	Пыль + 30% FeS_2	0,30	96,42
600	90	Пыль + 30% FeS_2	2,19	72.11
600	90	Пыль + 50% FeS_2	0,78	88.97
Совместное влияние восстановителя и пирита				
600	90	Пыль + 30% FeS_2 + 0% С	2,19	72,11
600	90	Пыль + 40%FeS_2 + 20% С	0,57	90,69
600	90	Пыль + 30%FeS_2 + 30% С	0,68	89,30

пыли с пиритом с добавкой восстановителя, однако при повышении температуры обжига до 750°С и выше зависимость меняется: более высокие показатели извлечения мышьяка достигаются при обработке смеси, состоящей только из пыли и пирита (без восстановителя). В данных условиях при 750°С удалось добиться максимального извлечения мышьяка в газовую фазу 96%. Однако при наличии восстановителя в навеске максимальное значение извлечения мышьяка в газовую фазу при 600°С составило 89%.

При этом минимальная величина извлечения мышьяка составила 47% при температуре обжига пыли 550°С, без добавки восстановителя. Установлено, что добавка в навеску отсевов кокса позволяет снизить температуру процесса, при которой идет интенсивная отгонка As_2O_3. Извлечение мышьяка в присутствии кокса в навеске при тех же 550°С поднялось до 61%.

Продолжительность обжига. Согласно данным табл. 1, количество удаленного мышьяка при одинаковом составе навески (доле пирита в навеске 30 масс. %) заметно снижалось при уменьшении продолжительности обжига с 90 до 60 мин – при температуре обжига 700°С извлечение мышьяка в газовую фазу снижалось с 63% до 41%. В то же время увеличение продолжительности обработки до 120 мин не приводило к улучшению показателя извлечения мышьяка.

Доля пиритного концентрата. Кроме того, негативно влияло уменьшение доли пирита в навеске: снижение с 30 до 25 масс. % от количества пыли приводило к ухудшению извлечения мышьяка с 96 до 35% при оптимальных условиях (температура обжига 750°С, продолжительность процесса 90 мин). Увеличение в навеске доли FeS_2 до 50 масс. % медеплавильной пыли позволило поднять извлечение мышьяка с 72% до 89%,



a *b* *c*

Рис. 1. *Стадии появления осадка на охлаждаемом конце кварцевой трубки: a – до включения печи; b – через 10 мин после включения печи (при нагреве до 500°С); c – после завершения опыта (при нагреве до 800°С)*
Fig. 1. *Deposition stages at the cooled end of the quartz tube: a – before switching on the furnace; b – 10 min after switching on the furnace (when heated up to 500°C); c – after completion of the experiment (when heated up to 800°C)*

несмотря на то, что обжиг проводился при температуре 600°С.

Совместное влияние доли пиритного концентрата и восстановителя. В случае присутствия в навеске одновременно пирита и восстановителя варьирование их количества несущественно влияет на степень удаления мышьяка. Однако с помощью обеих добавок, внесенных вместе, температуру обжига, при которой извлечение токсичного компонента пыли достигает 90%, удается снизить до 600°С.

Форма мышьяка. При обжиге смеси пыли с пиритом в инертной атмосфере на охлаждаемых частях кварцевых трубок, через которые подавалось дутье, появляется характерный сухой осадок (рис. 1), который достаточно легко удаляется с поверхности трубки (рис. 2).

Рентгеноспектральный анализ осадка показал, что данный материал преимущественно (до 93%) состоит из мышьяка, остальное представлено оксидами кальция, калия, бария, а также соединениями серы.

Результаты химического анализа огарков, полученных в опытах, когда было достигнуто максимальное значение извлечения мышьяка в газовую фазу (выше 89%), показаны в табл. 2.

Рис. 2. *Внешний вид осадка на охлаждаемых концах кварцевых трубок*
Fig. 2. *Sediment on the cooled ends of quartz tubes*

Огарок, согласно данным рентгеноспектрального анализа, на 94–96 масс. % представлен соединениями железа, цинка, меди и свинца, то есть пригоден для возврата в процесс производства меди и может быть

Таблица 2. Элементный состав огарка после удаления мышьяка в газовую фазу
Table 2. Elemental composition of cinder after arsenic removal into the gas phase

Содержание в исходной пыли, %	**As**	**Zn**	**Cu**	**Fe**	**Pb**
	7,12	34,89	20,02	17,07	17,74
Содержание в огарке, %					
Извлечение As, %	As	Zn	Cu	Fe	Pb
88,97	0,78	25,89	17,63	38,73	13,45
89,30	0.68	29,99	19,15	31,04	15,45
90,69	0,57	27,63	17,53	36,76	13,92
90,93	0,72	29,29	18,27	34,16	14,30
96,42	0,31	29,37	18,60	35,11	13,63
95,11	0,40	28,19	17,87	34,98	12,81
97,00	0,33	24,33	13,48	42,85	9,58
97,00	0,27	25,26	14,63	46,43	9,43

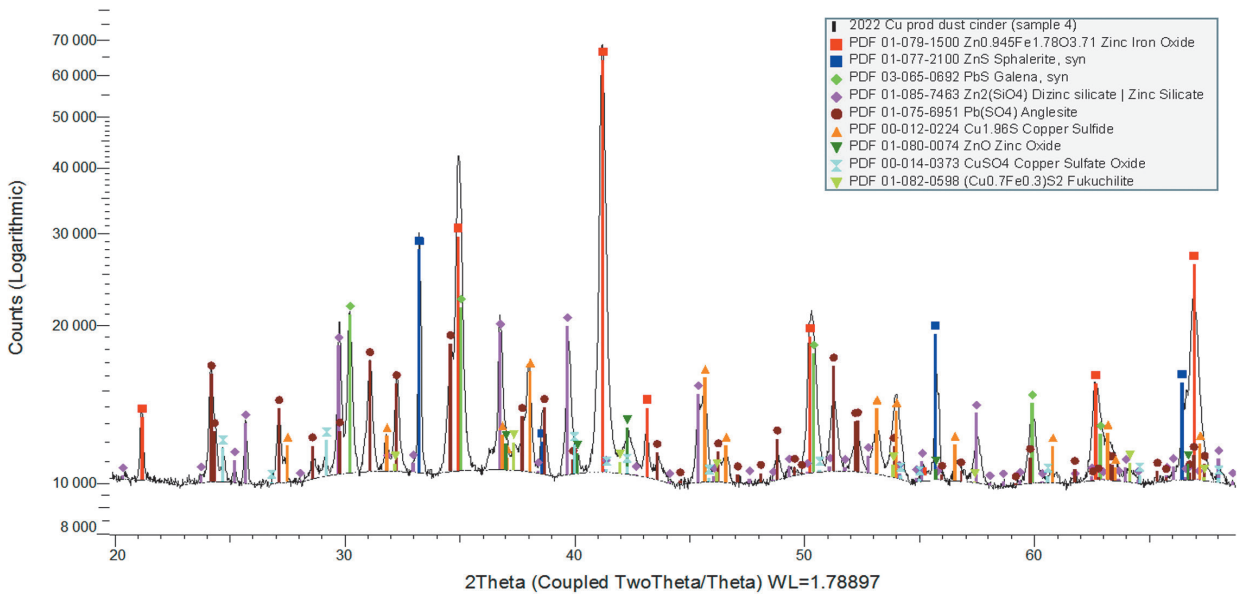


Рис. 3. *Качественный фазовый анализ огарка после обжига (фрагмент дифрактограммы, DiffracSuite EVA v6.0; ICDD PDF-2 2019; логарифмический масштаб по оси y)*
Fig. 3. *Qualitative phase analysis of cinder after roasting (diffraction pattern fragment, DiffracSuite EVA v6.0; ICDD PDF-2 2019; logarithmic scale along the y-axis)*

направлен непосредственно в плавильный агрегат. Остаточное содержание мышьяка находится в диапазоне 0,3–0,9%, то есть не превышает 1 масс. %, что подтверждается данными качественного и количественного анализов огарка после обжига, приведенными на рис. 3–4.

Также была осуществлена серия опытов по обжигу пыли с заменой пиритного концентрата в навеске на сульфидный цинковый концентрат, которая показала достаточно высокую эффективность. Удаление мышьяка из «тонкой» пыли электрофильтров в газовую фазу в этом случае достигает 87–88%.

Таким образом, для удаления токсичного компонента с сохранением цинка и меди в огарке, при переработке пыли медеплавильного производства следует рассмотреть вариант окислительного обжига, когда смесь пыли с некондиционным пиритным концентратом и восстановителем в равных долях (по 30 масс. %) подвергают нагреву до 850–900 °С и выдержке смеси в течение 1 ч в слабоокислительной атмосфере, которая достигается подачей воздушного дутья в течение всего процесса обжига.

Так как при недостатке кислорода максимального окисления сульфидной серы не происходит, при реализации технологии в

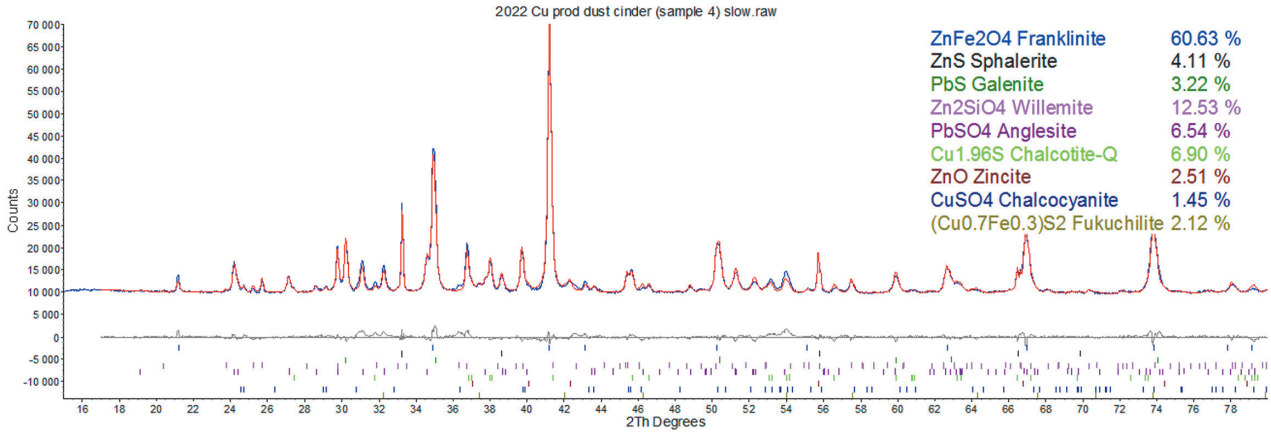


Рис. 4. *Полуколичественный фазовый анализ огарка методом Ритвельда (в легенде приведена доля фаз в вес. %)*
Fig. 4. *Semi-quantitative phase analysis of cinder with the Rietveld method. The legend shows the phase's proportion in the mass percentage %*

промышленном масштабе рекомендуется проведение двухстадийного обжига. На первой стадии обжига, проводимой в условиях ограниченного доступа воздуха, мышьяк в виде As_2O_3 отгоняется в газовую фазу, а полученный огарок поступает на вторую стадию, где уже при избытке кислорода происходит окисление сульфидной серы.

Подобный эффект достигается при одностадийном противоточном обжиге, когда исходный материал в первый период обжига контактирует с уже частично использованными газами, имеющими невысокое содержание кислорода в них. Вследствие чего в первый период обжига будет удаляться мышьяк, а по мере дальнейшего продвижения материала в печи он будет контактировать с обогащенным кислородом газом, и огарок на выходе из печи становится беднее не только по мышьяку, но и по сере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения лабораторных исследований по удалению мышьяка из «тонких» пылей медеплавильного производства предлагается способ обжига материала совместно с некондиционным пиритным концентратом.

1. Были определены условия процесса, при которых остаточное содержание токсичного элемента в огарках составляет менее 0,30 масс. % и одновременно удается сохранить целевые металлы (медь, цинк, железо, свинец), что позволяет возвращать полученный промпродукт в производство меди на стадии конвертирования.

2. Установлено, что на удаление мышьяка в газовую фазу определяющее влияние оказывает температура обработки, продолжительность обжига, доля пирита и наличие восстановителя в навеске.

3. Было найдено, что при обжиге шихтовой смеси при температуре 750–800°С в течение 1,5 ч в инертной атмосфере из навески пыли с 30 масс. % пиритного концентрата извлечение мышьяка в газовую фазу достигает 91–96%.

4. Показано, что возможно снизить температуру пирометаллургической обработки до 600°С, для чего в смесь медеплавильной пыли с пиритом требуется добавить восстановитель или же повысить долю пирита в навеске до 50 масс. % и выдержать смесь в течение 1,5 ч в инертной среде или при использовать дутье с недостатком кислорода. При этом извлечение мышьяка в газовую фазу достигает 89–91%.

5. При добавлении в шихтовую смесь восстановителя в количестве 30% и подаче воздушного дутья извлечение мышьяка увеличивается до 97% при условии, что обжиг ведется при температуре 850°С. Однако при этом возгоняются свинец и часть цинка, а в огарке концентрируется железо и интенсивно протекают процессы ферритизации цинка и меди, что делает нецелесообразным последующее выщелачивание полученного материала. Поэтому одним из вариантов переработки огарка после стадии деарсенизации может быть вельцевание совместно с другими цинксодержащими отходами (кеками или пылями).

Список источников

1. Shoira M., Khojiev S., Rakhmataliev S., Ibrohim A., Mukhammadali M. Modern technologies of copper production // International Journal of Engineering and Information Systems. 2021. Vol. 5. Iss. 5. P. 106–120.
2. Шайбакова Л.Ф. Мировые и российские тенденции инновационного развития производства меди // Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. 2018. № 3. Режим доступа: https://eee-region.ru/article/5505/ (дата обращения: 29.09.2023).
3. Юсупходжаев А.А., Хожиев Ш.Т., Сайназаров А.М., Курбанов Б.Т. Современное состояние и перспективы развития автогенных процессов переработки сульфидных медных концентратов // Инновационное развитие науки и образования: сб. статей X Междунар. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 10 марта 2020 г.). Пенза: Наука и Просвещение, 2020. С. 20–24. EDN: XPWZJH.
4. Мильке Э.Г., Кузгибеков Х.М., Исабаев С.М. Пирометаллургическая переработка медномышьяковистого шлама // Комплексное использование минерального сырья. 1990. № 1. С. 64–66.
5. Васильев А.А., Урлапкина Н.Н., Минеев Г.Г. Экстракционная очистка медного электролита от мышьяка // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 11. С. 160–168. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-10-160-168. EDN: ZSKHBN.
6. Набойченко С.С., Мамяченков С.В., Карелов С.В. Мышьяк в цветной металлургии: монография. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 240 с. EDN: QMZNIZ.
7. Селиванов Е.Н., Новиков Д.О., Беляев В.В., Скопов Г.В. Распределение мышьяка по продуктам пирометаллургической переработки медно-цинкового концентрата // Цветные металлы. 2020. № 1. С. 14–18. https://doi.org/10.17580/tsm.2020.01.02. EDN: MXVZTP.

8. Пономарева Е.И., Соловьева В.Д., Боброва В.В. Мышьяк в свинцово-цинковом и медном производствах // Комплексное использование минерального сырья. 1978. № 1. С. 66–71.
9. Федотова Е.И., Кирр Л.Д., Калинина Э.И. К вопросу распределения мышьяка по продуктам медеплавильного производства // Труды института Унипромедь. 1972. Вып. 15. С. 135–138.
10. Yang Jiejie, Guo Ziwen, Jiang Luhua, Sarkodie E.K., Li Kewei, Shi Jiaxin, et al. Cadmium, lead and arsenic contamination in an abandoned nonferrous metal smelting site in southern China: chemical speciation and mobility // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2022. Vol. 239. P. 113617. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113617.
11. Пат. № 2483129, Российская Федерация, C22B 7/00. Способ обезвреживания мышьяксодержащих сульфидных кеков / О.Г. Передерий, С.Э. Кляйн, В.А. Потылицин, В.В. Воронов, А.В. Воронов, Е.Н. Селиванов; заявитель и патентообладатель Государственный научно-исследовательский, проектный и конструкторский институт горного дела и металлургии цветных металлов ФГУП «Гипроцветмет». Заявл. 02.03.2012; опубл. 27.05.2013. Бюл. № 5.
12. Палфи П., Молнар Л., Вирчикова Э. Идентификация и удаление мышьяка из пиритных и цинк-сульфидных концентратов // Цветные металлы. 2005. № 5-6. С. 79–82. EDN: QAFIBT.
13. Li Lin, Wang Jingxiu, Wu Chengqian, Ghahreman A. An environmentally friendly method for efficient atmospheric oxidation of pyrrhotite in arsenopyrite/pyrite calcine // Chemical Engineering Journal Advances. 2021. Vol. 7. P. 100122. https://doi.org/10.1016/j.ceja.2021.100122.
14. Исабаев С.М., Кузибекова Х.М., Жинова Е.В., Зиканова Т.А. Разработка технологии окислительного обжига золотомышьяковистых концентратов двойной упорности // Комплексное использование минерального сырья. 2015. Вып. 294. № 3. С. 27–31. EDN: ZAAZZB.
15. Антипов Н.И. Вывод мышьяка из технологического цикла в производстве цветных металлов // Цветные металлы. 1996. № 4. С. 56–59.
16. Ганимов М.Д. [и др.]. Поведение мышьяка и редких металлов при окислительном обжиге // Цветные металлы. 1961. № 12. С. 21.
17. Wang Hong-yang, Zhu Rong, Dong Kai, Zhang Si-qi, Wang Yun, Lan Xin-yi. Effect of injection of different gases on removal of arsenic in form of dust from molten copper smelting slag prior to recovery process // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2023. Vol. 33. Iss. 4. P. 1258–1270. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(23)66180-1.
18. Paleev P.L., Gulyashinov P.A., Gulyashinov A.N. Thermodynamic modeling of dearsenation of rebellious gold–quartz–arsenic ore in water vapor // Journal of Mining Science. 2016. Vol. 52. P. 373–377. https://doi.org/10.1134/S1062739116020526.
19. Tang Xiao-wei, He Yue-hui. Arsenic extraction from copper concentrate using controlled oxidative roasting and filtration process // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2023. Vol. 33. Iss. 10. P. 3198–3209. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(23)66327-7.
20. Yao Wen-ming, Min Xiao-bo, Li Qing-zhu, Li Kai-zhong, Wang Yun-yan, Wang Qing-wei, et al. Formation of arsenic–copper-containing particles and their sulfation decomposition mechanism in copper smelting flue gas // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2021. Vol. 31. Iss. 7. P. 2153–2164. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65645-5.

References

1. Shoira M., Khojiev S., Rakhmataliev S., Ibrohim A., Mukhammadali M. Modern technologies of copper production. *International Journal of Engineering and Information Systems*. 2021;5(5):106-120.
2. Shajbakova L.F. Global and Russian tendencies of innovative development of copper production. *Regional economy and management: electronic scientific journal*. 2018;3. Available from: https://eee-region.ru/article/5505/ [Accessed 29th September 2023]. (In Russ.).
3. Yusupkhodjaev A.A., Saynazarov A.M., Khojiev Sh.T., Kurbanov B.T. Current state and prospects for the development of autogenous processes for processing sulfide copper concentrates. In: *Innovacionnoe razvitie nauki i obrazovaniya: sbornik statej X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii = Innovative development of science and education: collected articles of the 10th International scientific and practical conference*. 10 March 2020, Penza. Penza: Nauka i Prosveshchenie; 2020, p. 20-24. (In Russ.). EDN: XPWZJH.
4. Mil'ke E.G., Kuzgibekov H.M., Isabaev S.M. Pyrometallurgical processing of copper-arsenic sludge. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya*. 1990;1:64-66. (In Russ.).
5. Vasiliev A.A., Urlapkina N.N., Mineev G.G. Solvent extraction of arsenic from copper electrolyte. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(10):160-168. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-10-160-168. EDN: ZSKHBN.
6. Naboichenko S.S., Mamyachenkov S.V., Karelov S.V. *Arsenic in non-ferrous metallurgy*. Ekaterinburg: UrO RAN; 2004, 240 p. (In Russ.). EDN: QMZNIZ.
7. Selivanov E.N., Novikov D.O., Belyaev V.V., Skopov G.V. Distribution of arsenic between the pyrometallurgical products of copper-zinc concentrate. *Tsvetnye Metally*. 2020;1:14-18. (In Russ.). https://doi.org/10.17580/tsm.2020.01.02. EDN: MXVZTP.

8. Ponomareva E.I., Solovieva V.D., Bobrova V.V. Arsenic in lead-zinc and copper production. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya*. 1978;1:66-71. (In Russ.).
9. Fedotova E.I., Kupp L.D., Kalinina E.I. On the issue of arsenic distribution among copper smelting products. *Trudy institutata Unipromed'*. 1972;15:135-138. (In Russ.).
10. Yang Jiejie, Guo Ziwen, Jiang Luhua, Sarkodie E.K., Li Kewei, Shi Jiaxin, et al. Cadmium, lead and arsenic contamination in an abandoned nonferrous metal smelting site in southern China: chemical speciation and mobility. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2022;239:113617. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113617.
11. Perederiy O.G., Klyain S.E., Potylitsin V.A., Voronov V.V., Voronov A.V., Selivanov E.N. *Method for neutralizing arsenic-containing sulfide cakes*. Patent RF, no. 2483129; 2013. (In Russ.).
12. Palfi P., Molnar L., Virchikova E. Identification and removal of arsenic from pyrite and zinc sulfide concentrates. *Tsvetnye metally*. 2005;5-6:79-82. (In Russ.). EDN: QAFIBT.
13. Li Lin, Wang Jingxiu, Wu Chengqian, Ghahreman A. An environmentally friendly method for efficient atmospheric oxidation of pyrrhotite in arsenopyrite/pyrite calcine. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2021;7:100122. https://doi.org/10.1016/j.ceja.2021.100122.
14. Isabaev S.M., Kuzibekova H.M., Zhinova E.V., Zikanova T.A. Development of technology for oxidizing roasting of gold-arsenic concentrates of double persistence. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya*. 2015;294(3):27-31. (In Russ.). EDN: ZAAZZB.
15. Antipov N.I. Arsenic removal from the technological cycle in non-ferrous metal production. *Tsvetnye metally*. 1996;4:56-59. (In Russ.).
16. Ganimov M.D., et al. Arsenic and rare metals behavior during oxidative roasting. *Tsvetnye metally*. 1961;12:21. (In Russ.).
17. Wang Hong-yang, Zhu Rong, Dong Kai, Zhang Si-qi, Wang Yun, Lan Xin-yi. Effect of injection of different gases on removal of arsenic in form of dust from molten copper smelting slag prior to recovery process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.* 2023;33(4):1258-1270. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(23)66180-1.
18. Paleev P.L., Gulyashinov P.A., Gulyashinov A.N. Thermodynamic modeling of dearsenation of rebellious gold–quartz–arsenic ore in water vapor. *Journal of Mining Science*. 2016;52:373-377. https://doi.org/10.1134/S1062739116020526.
19. Tang Xiao-wei, He Yue-hui. Arsenic extraction from copper concentrate using controlled oxidative roasting and filtration process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2023;33(10):3198-3209. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(23)66327-7.
20. Yao Wen-ming, Min Xiao-bo, Li Qing-zhu, Li Kai-zhong, Wang Yun-yan, Wang Qing-wei, et al. Formation of arsenic–copper-containing particles and their sulfation decomposition mechanism in copper smelting flue gas. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2021;31(7):2153-2164. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65645-5.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мамяченков Сергей Владимирович,
д.т.н., с.н.с.,
заведующий кафедрой металлургии
цветных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
s.v.mamiachenkov@urfu.ru
https://orcid.org/0000-0001-6070-8746

Блудова Дана Иршековна,
ассистент кафедры
металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
✉ dana.bludova@urfu.ru

Ханжин Никита Андреевич,
аспирант,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
Khanzhinn@ya.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. Mamyachenkov,
Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Head of the Department
of Non-Ferrous Metals Metallurgy,
Ural Federal University named after
the First President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
s.v.mamiachenkov@urfu.ru
https://orcid.org/0000-0001-6070-8746

Dana I. Bludova,
Assistant Professor of the Department
of Non-Ferrous Metals Metallurgy,
Ural Federal University named after
the First President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
✉ dana.bludova@urfu.ru

Nikita A. Khanzhin,
Postgraduate Student,
Ural Federal University named after
the First President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
Khanzhinn@ya.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Мамяченков Сергей Владимирович является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2015 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 09.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 16.04.2024 г.; принята к публикации 20.05.2024 г

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the article.

Conflict of interests

Sergey V. Mamyachenkov has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2015 but he was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected to the Journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interest.

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

Information about the article

The article was submitted 09.03.2024; approved after reviewing 16.04.2024; accepted for publication 20.05.2024.

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

iPolytech Journal

Том 28, № 2. 2024 / Vol. 28, No. 2. 2024

Уважаемые коллеги!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации

I. Статья представляется **в электронном и распечатанном видах**. Рекомендуемый объем статьи не менее 20 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение.
2. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (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 **в виде файла с расширением *.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;
2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
4) рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word или в MS Excel, с приложением файлов (представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах);**
5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

«iPolytech Journal» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, (Категория К-1) в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «КиберЕВSCO, в Ленинка» (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.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.
Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный секретарь.
Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: pgp@istu.edu

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

iPolytech Journal

Том 28, № 2. 2024 / Vol. 28, No. 2. 2024

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 30.06.2024 г.
Формат 60x90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 25,75.
Тираж 500 экз. Номер по реестру 34/3н.

Издание распространяется бесплатно

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