

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

iPolytech Journal

Tom **28**, № 1. 2024 / Vol. **28**, No. 1. 2024



<https://ipolytech.ru>

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

iPolytech Journal

Tom 28, № 1. 2024 / Vol. 28, No. 1. 2024



<https://ipolytech.elpub.ru>



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

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 tekhnicheskogo 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 ФC77- 42847 of November 26, 2010,

ПИ No ФC77-47902 of December 22, 2011;

ПИ No ФC77-62813 of August 18, 2015).

Founder and Publisher:

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

Publishers:

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

Editorial office:

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



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) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

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) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

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

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

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

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

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

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

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

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 электросистем и распределенной энергетики (Москва, Россия) (РИНЦ) (ORCID) (Scopus)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СУНЬ Хуалин, профессор Цзянсуского университета (Чженьцзян, Китай) (Scopus)

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

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

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

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

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

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

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) (PIHL) (ORCID) (Scopus)

DEPUTIES OF CHIEF EDITOR:

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

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) (PIHL) (ORCID) (Scopus)

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) (PIHL) (ORCID) (Scopus)

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

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

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

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) (PIHL) (ORCID) (Scopus)

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) (PIHL) (ORCID) (Scopus)

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

Andrey V. KRYUKOV, Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Transport, Corresponding member of the Academy of Sciences, Higher School of the Russian Federation and the Russian Academy of Engineering, Honored Power Engineer of the Republic of Buryatia, Advanced Professor, Department of Transport Electric Power Industry, Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)

Paul LEAHY, Professor at University College Cork (Department of Wind Power); Funded Investigator in the Science Foundation Ireland MAREI Centre for Marine, Climate and Energy research (Cork, Ireland) (ORCID) (Scopus)

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

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

Mikhail M. MATLIN, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Head of the Department of Machine Parts and Hoisting-and-Transport Devices, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia) (PIHL) (Scopus)

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

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

Andrey V. PAZDERIN, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automated Electric Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia) (PIHL) (ORCID) (Scopus)

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

Mohammad Mehdi RASHIDI, Professor Tongji University, (China) (ORCID) (Scopus)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Berholt SCHOLTES, Director, Institute of Metal Science, University of Kassel (Kassel, Germany) (ORCID) (Scopus)



Содержание

Машиностроение

Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Деформация материала и стружкообразование при действии единичного абразивного зерна	10
Игнатьев Ф.Ю. Формальный метод выбора черновых баз с использованием графов размерных связей при механической обработке деталей.	21
Ли Дэгэнь, Цзя Вэньбо, Жэнь Чуньпин. Оптимизационная конструкция механизма регулирования высоты барабана машины для добычи угля на основе алгоритма роя частиц (на англ.)	31
Махалов М.С., Кречетов А.А., Блюменштейн В.Ю., Горбатенко В.В. Исследование распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после механической обработки методами сверления зондирующих отверстий и цифровой корреляции изображений.....	40
Непогожев А.А., Мокрицкий Б.Я., Скрипилёв А.А., Аникин В.Н., Марьин С.Б. Прогнозирование и примеры совершенствования абразивного инструмента для бесцентрового шлифования сталей.....	51
Швалева Н.А., Фадеев А.А., Шестаков И.Я. Моделирование электрического поля при электрохимическом формообразовании полости тонкостенной детали.....	64

Энергетика

Глазунова А.М., Съемщиков С.Е. Формирование суточных графиков нагрузок в экологически дружественном активном энергетическом комплексе	72
Давыдов А.Е., Боченков Б.М., Панкрац Ю.В. Алгоритмы двухзонного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами	84
Идрисов А.Р., Ачитаев А.А. Обзор методов реализации виртуальной инерции в условиях работы энергосистем с ветровыми и солнечными электростанциями.....	95
Лю Сун, Парихар К.С., Патхак М.К., Сидоров Д.Н. Оптимизация объединения нейронных сетей для прогнозирования фотоэлектрической энергии (на англ.).....	111
Якубовский Д.В., Крупенёв Д.С., Бояркин Д.А. Коррекция элементов мутантных векторов метода дифференциальной эволюции при решении задачи минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем	124

Металлургия

Василькова А.О., Бывальцев А.В., Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И. Разработка технологии извлечения золота из хвостов обогащения полиметаллических руд.....	139
Мохирева Н.Л., Логинова И.В., Миролюбов В.Р., Шопперт А.А. Опыт решения проблемы фильтрования и промывки неструктурированных осадков гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама	149
Пинаев А.А., Радионов Е.Ю., Орлов И.А., Немчинова Н.В. Изучение особенностей магнитогидродинамики электролизёров С-8БМ (С-8Б) при модернизации алюминиевых заводов	162
Якорнов С.А., Мальцев Г.И., Воинков Р.С., Гребнева А.А. Кинетические закономерности выщелачивания цинка из промпродуктов.....	178

Content

Mechanical engineering

Dimov Yu.V., Podashev D.B. Material deformation and chip formation under single abrasive grain action	10
Ignatiev F.Yu. Formal method for selecting rough datum in part machining using graphs of dimensional relationships	21
Li Degen, Jia Wenbo, Ren Chunping. Optimization design of shearer drum height adjusting mechanism based on particle swarm optimization algorithm (Eng.)	31
Makhalov M.S., Krechetov A.A., Blumenstein V.Yu., Gorbatenko V.V. Study of the distribution of residual stresses across the surface layer depth following machining through probing hole drilling and digital image correlation	40
Nepogozhev A.A., Mokritskii B.Ya., Skripilev A.A., Anikin V.N., Maryin S.B. Forecasting and examples of abrasive tool improvement for centerless steel grinding	51
Shvaleva N.A., Fadee A.A., Shestakov I.Ya. Electric field simulation in the electrochemical machining of a thin-walled part cavity	64

Power engineering

Glazunova A.M., Sieemshchikov S.E. Design of daily load profiles in environmentally friendly commercial and industrial microgrids	72
Davydov A.E., Bochenkov B.M., Pankrats Yu.V. Algorithms for dual-zone control of a permanent-magnet synchronous motor	84
Idrisov A.R., Achitaev A.A. Overview of methods for implementing virtual inertia in energy systems with wind and solar power plants	95
Liu Song, Parihar K.S., Pathak M.K., Sidorov D.N. Neural network fusion optimization for photovoltaic power forecasting (Eng.)	111
Iakubovskii D.V., Krupenev D.S., Boyarkin D.A. Adjustment of mutant vector elements in the differential evolution method for solving the problem of power shortage minimization in electric power systems	124

Metallurgy

Vasilkova A.O., Byvaltsev A.V., Khmel'nitskaya O.D., Voiloshnikov G.I. A technology for gold extraction from tailings resulting from polymetallic ore beneficiation	139
Mokhireva N.L., Loginova I.V., Mirolyubov V.R., Shoppert A.A. Experience in solving the problem of filtering and washing unstructured sediments of hydrometallurgical processing of polymetal sludge	149
Pinaev A. A., Radionov E.Yu., Orlov I. A., Nemchinova N.V. Analysis of the magnetohydrodynamic parameters of S-8BM(S-8B) electrolyzers in the modernization of aluminum smelters	162
Yakornov S.A., Maltsev G.I., Voinkov R.S., Grebneva A.A. Kinetics of zinc leaching from intermediate feedstocks	178



Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию выпуск научного журнала «iPolytech Journal». Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Министерства науки и высшего образования РФ (Категория К-1).

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

«iPolytech Journal» реферируется и рецензируется

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

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

Редколлегия

Dear Readers!

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

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

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

The journal "iPolytech Journal" is abstracted and reviewed

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

- **Mechanical Engineering**

- 2.5.2. Mechanical engineering (engineering sciences)
- 2.5.5. Technology and equipment for mechanical and physical and technical machining (engineering sciences)
- 2.5.6. Engineering technology (technical sciences)

- **Power Engineering**

- 2.4.2. Electrotechnical equipment and systems (engineering sciences)
- 2.4.3. Electric power industry (engineering sciences)
- 2.4.5. Energy systems and complexes (engineering sciences)

- **Metallurgy**

- 2.6.2. Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals (engineering sciences)

Editorial Board



Деформация материала и стружкообразование при действии единичного абразивного зерна

Ю.В. Димов^{1✉}, Д.Б. Подашев²

^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Целью работы является определение объема материала, разрушенного единичным зерном (единичным микровыступом), производящим упругое и пластическое деформирование материала при взаимодействии абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью. Для расчета интенсивности деформации пластически отнесенного материала заготовки под действием единичного зерна использован метод линий скольжения (метод характеристик). Для определения объема материала, разрушенного единичным зерном в результате полидеформирования, при его перемещении в тангенциальном направлении определены: площадь деформированного материала, интенсивность деформации сдвига, интенсивность скорости деформации сдвига, количество циклов пластического деформирования, необходимое для разрушения материала в различных зонах поля линий скольжения. Решение этих задач выполнено с использованием радиусов кривизны линий скольжения в физических плоскостях и в плоскостях годографов скоростей для меридиональной и нормальной к оси плоскостях сечения зерна. Определена упругая деформация материала, которая учитывается при расчете шероховатости обрабатываемой поверхности. Рассмотрено стружкообразование при действии единичного зерна с определением площади поперечного сечения стружки. Это позволило перейти к определению съема материала при абразивной обработке. Теоретические положения по определению перечисленных выше показателей подтверждены экспериментальными данными. Таким образом, исследования, проведенные методом линий скольжения, позволили определить объем пластически деформированного материала, величины и скорости деформации при действии единичного зерна, объем удаленного материала в результате многократного пластического деформирования и в виде стружки. Проведенные исследования являются составной частью исследования производительности процесса и шероховатости обработанной поверхности при финишной обработке заготовок эластичными полимерно-абразивными инструментами и свободными абразивными частицами.

Ключевые слова: единичное зерно, поле линий скольжения, пластическая деформация, упругая деформация, стружкообразование

Для цитирования: Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Деформация материала и стружкообразование при действии единичного абразивного зерна // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 10–20. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-10-20>. EDN: YFVUTK.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Material deformation and chip formation under single abrasive grain action

Yury V. Dimov^{1✉}, Dmitry B. Podashev²

^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the work is to determine the volume of material destroyed by a single grain (microasperity), which produces elastic and plastic deformation of the material when an abrasive tool interacts with the treated surface. To calculate the intensity of deformation of the plastically displaced material of the workpiece under the action of a single grain, the slip-line technique (method of characteristics) was used. To determine the volume of material destroyed by a single grain as a result of polydeformation when moving in the tangential direction, the following is determined: area of the deformed material; intensity of the shear deformation; speed of the shear deformation rate; number of plastic deformation cycles necessary for the destruction of the material in various zones of the sliding line field. The solution to these problems is found using the radii of curvature of the sliding lines in the physical planes and in the planes of

the velocity hodographs for the meridional and normal to the axis planes of the grain section. The determination of the elastic deformation of the material is taken into account when calculating the roughness of the treated surface. Chip formation under the action of a single grain is considered taking into account the determination of the cross-sectional area of chips. This formed the basis for a determination of material removal during abrasive processing. The theoretical provisions for the determination of the above indicators are confirmed by experimental data. Thus, the studies carried out by the slip-line method formed a basis for determining the volume of plastically deformed material, the magnitude and rate of deformation under the action of a single grain, as well as the volume of the removed material as a result of repeated plastic deformation and in the form of chips. The performed investigation forms an integral part of studies into the process performance and roughness of the machined surface when finishing workpieces with elastic polymer-abrasive tools and free abrasive particles.

Keywords: single grain, slip line field, plastic deformation, elastic strain, chip formation

For citation: Dimov Yu.V., Podashev D.B. Material deformation and chip formation under single abrasive grain action. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):10-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-10-1-20>. EDN: YFVUTK.

ВВЕДЕНИЕ

При финишной обработке поверхностей эластичными полимерно-абразивными инструментами, хонингованием, суперфинишированием, а также в среде или в потоке свободных абразивных частиц с целью уменьшения шероховатости съем материала осуществляется при взаимодействии режущего микрорельефа инструмента с обрабатываемым материалом. Исследованию процесса обработки абразивным инструментом посвящен ряд работ [1–10].

При воздействии абразивного инструмента на обрабатываемую поверхность единичное зерно (единичный микровыступ) производит упругое и пластическое деформирование материала. После соприкосновения с поверхностью начинается упругое деформирование, переходящее по мере углубления в пластическое. Глубина внедрения зерна зависит от кинетической энергии перемещения в нормальном к поверхности направлении. При достижении нормальной составляющей скорости относительного движения нулевого значения начинается вытеснение абразивного зерна под действием слоев материала, находящегося в упругодеформированном состоянии, и при наличии продольного перемещения формируется шероховатость обработанной поверхности.

Перемещение частицы в параллельном обрабатываемой поверхности направлении сопровождается микрорезанием материала детали.

Количество снятого в процессе обработки материала складывается из объемов, ушедших в стружку и разрушенных в результате полидеформирования.

В данной статье рассматривается аналитическое определение объема, пластически

деформированного и удаляемого при полидеформировании материала и в виде стружки под действием единичного абразивного зерна, а также глубина его внедрения в обрабатываемый материал.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При исследовании в качестве модели единичного зерна принят конус с закругленной по радиусу вершиной. Такая форма зерна, как показали исследования профилограмм микрогеометрии поверхности обрабатывающего инструмента, наиболее близка к геометрии единичного микровыступа. Кроме того, замена действительной поверхности геометрически простыми формами облегчает математическое моделирование исследуемого процесса. Подобную форму модели при исследовании процессов обработки с применением абразива использовали многие исследователи [11–14].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные исследования являются продолжением работы, выполненной в [15]. При внедрении зерна под углом δ к поверхности под действием нормальной P и тангенциальной T составляющих сил резания впереди его образуется валик наплыва, который при определенных условиях может переходить в стружку. Для расчета интенсивности деформации пластически оттесняемого материала заготовки под действием единичного зерна использован метод линий скольжения (метод характеристик), который подробно рассмотрен в статье [15].

Поле линий скольжения в меридиональных сечениях для подобных нашему условий пластического деформирования и формы индентора [16, 17] состоит из зон ADW, WDGJ,

JGT и TGS. При этом η -линии скольжения представляют собой прямые линии, а ξ -линии скольжения являются криволинейными.

Поле линий скольжения в сечениях, нормальных к оси зерна, имеет прямолинейные τ - и криволинейные λ -линии скольжения. Аналогичное поле линий скольжения было рассмотрено А.Д. Томленовым [18].

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МАТЕРИАЛА

В результате многократного пластического деформирования обрабатываемый материал разрушается и происходит его отделение объемом ΔQ_{nl} .

Объем материала, разрушенного единичным зерном при его перемещении в тангенциальном направлении на Δx :

$$\Delta Q_{nl} = \frac{S_{деф} \cdot \Delta x}{n_n},$$

где $S_{деф}$ – площадь деформированного материала, мм²; n_n – количество циклов пластического деформирования, необходимое для разрушения материала.

Согласно [19]:

$$n_n = (\varepsilon_0/\varepsilon)^{tn},$$

где ε – деформация удлинения (сжатия), мм; ε_0 – критическая разрушающая деформация (экстраполированное значение ε до $n_n = 1$); tn – показатель кривой малоциклового усталости материала (константа материала).

Деформации ε и ε_0 удлинения (сжатия) можно заменить интенсивностями сдвига:

$$\gamma_i \text{ и } \gamma_{i0}: n_n = (\gamma_{i0}/\gamma_i)^{tn}. \quad (1)$$

При объемном деформировании интенсивность сдвига с учетом параметра Одквиста, характеризующего накапливаемую пластическую деформацию, определится из выражения:

$$\gamma_i = \int_0^t \dot{\gamma}_i \cdot dt,$$

где t – время деформации, с; $\dot{\gamma}$ – интенсивность скорости деформации сдвига, с⁻¹ [18].

$$\dot{\gamma}_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{\dot{\gamma}_1^2 + \dot{\gamma}_2^2 + \dot{\gamma}_3^2},$$

где $\dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2, \dot{\gamma}_3$ – скорости главных деформаций сдвига.

Согласно принятой схеме полей линий

скольжения из уравнений Гейрингер и равенств $v_\eta = 0$ (в плоскости XY) и $v_\tau = 0$ (в плоскости XZ) следует, что вдоль характеристик второго семейства $v_\xi = \text{const}$ (в плоскости XY) и $v_\lambda = \text{const}$ (в плоскости XZ). Эти характеристики являются линиями тока.

Следовательно, $\dot{\gamma}_I = \dot{\gamma}_\xi \cdot \dot{\gamma}_2 = \dot{\gamma}_\lambda$. При известных γ_1 и γ_2 и условии, что материал обладает свойством несжимаемости, определим и третью скорость главной деформации сдвига:

$$\dot{\gamma}_3 = -(\dot{\gamma}_1 + \dot{\gamma}_2) = -(\dot{\gamma}_\xi + \dot{\gamma}_\lambda).$$

Тогда интенсивность скорости деформации:

$$\dot{\gamma}_i = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\dot{\gamma}_\xi^2 + \dot{\gamma}_\xi \cdot \dot{\gamma}_\lambda + \dot{\gamma}_\lambda^2}. \quad (2)$$

Площадь деформированного материала. В деформированном состоянии находятся зоны AGT и JGT – при $\varphi_G \leq \varphi_D$ или JGT и ADW – при $\varphi_G > \varphi_D$ (см. [15]).

При внедрении в пределах сферической части зерна (рис. 1) приращение площади равно:

$$dS_{деф} = dS_{AGJ} + dS_{JGS} = [Q_1 \cdot R_{\xi i} + (Q_2 + 1) \cdot R_{\xi JGT}] \cdot dR_{\xi}. \quad (3)$$

Здесь Q_1, Q_2 – углы поворота; η – линии скольжения для рассматриваемой точки в зонах AGT и JGT соответственно:

$$Q_1 = \varphi_{GS} - \varphi; \quad (4)$$

$$Q_2 = \pi/4 - \varphi_G - \varphi_G + \beta, \quad (5)$$

где $R_{\xi i}$ – радиус кривизны, мм; ξ – линии скольжения в зоне AGJ, которая определяется по уравнению:

$$R_{\xi i} = r \cdot [\cos \beta + \sin \beta \cdot (\varphi_i - \varphi_n)],$$

где $R_{\xi JGT}$ – тоже в зоне JGT, определяется по уравнению:

$$R_{\xi JGT} = r \cdot (\varphi_G - \varphi_n) \cdot \sin \beta.$$

Подставив выражения (2), (3), (4), и (5) в формулу (1) и проинтегрировав при $dR_{\xi} = r \cdot \sin \beta \cdot d\varphi$, получим:

$$S_{деф} = 0,5 \cdot r^2 \cdot \varphi_G^2 \cdot \sin^2 \beta \cdot (q - 2/3 \cdot \varphi_G), \quad (6)$$

где $q = \pi/4 - \varphi_{GS} + \beta + \text{ctg} \beta + 1$.

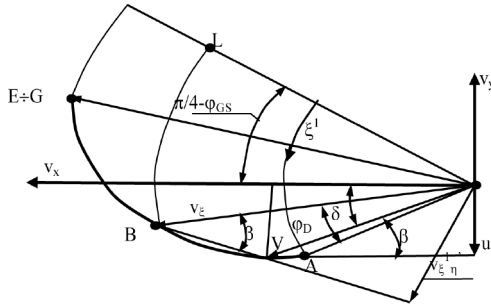


Рис. 1. Годограф скоростей в сечении XY
 Fig. 1. Velocity hodograph in XY section

Параметр q введен для упрощения написания уравнений (6).

Скорость деформации сдвига $\dot{\gamma}_\xi$. Максимальную скорость сдвига при плоском деформировании можно записать в виде [18]:

$$\dot{\gamma}_\xi = \frac{\rho_\xi}{R_\xi} - \frac{\rho_\eta}{R_\eta},$$

где R_ξ , R_η , ρ_ξ и ρ_η – радиусы кривизны линий скольжения в физической плоскости [15] и в плоскости годографа (см. рис. 1).

Поскольку скорость $v_\eta = 0$, радиус кривизны η – линий в плоскости годографа $\rho_\eta = 0$.

В результате это уравнение принимает следующий вид:

$$\dot{\gamma}_\xi = \frac{\rho_\xi}{R_\xi}.$$

По годографу (см. рис. 1) радиусы кривизны ξ^1 -линий, равные скоростям на ξ -линиях физического поля, определяются как

$$\rho_{\xi^1} = v_\xi = \frac{v_n}{\sin \beta} = \frac{u \cdot \cos \phi + v \cdot \cos \psi \cdot \sin \phi}{\sin \beta},$$

где v_n – скорость нормальная к поверхности зерна, мм/мин.

Окончательное выражение для определения скорости деформации в плоскости XY с учетом зависимостей $u = v \cdot \tan \beta$ и $R_{\xi^0} = r \cdot \cos \beta$ примет вид:

$$\dot{\gamma}_\xi = \frac{v \cdot (\tan \delta \cdot \cos \phi + \cos \psi \cdot \sin \phi)}{r \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta}. \quad (7)$$

Скорость деформации сдвига, как следует из выражения (7), неодинакова в пределах поля линий скольжения и зависит от коэффи-

циента пластического трения, представленного в формуле углом β , и глубины внедрения, которая определяется углом ϕ . Поэтому определим среднюю скорость сдвига в пределах всей площади деформации $S_{деф}$.

При внедрении в пределах **сферического участка зерна**:

$$\dot{\gamma}_{\xi cp} = \frac{1}{S_{деф}} \cdot \int_0^{\phi_G} \dot{\gamma}_\xi \cdot dS_{деф}. \quad (8)$$

После решения этого уравнения получим:

$$\dot{\gamma}_\xi = \frac{4 \cdot v}{r \cdot \sin 2\beta \cdot \phi_G^2 \cdot (q - 2/3 \cdot \phi_G)} \left\{ \tan \delta \cdot [(q - \phi_G) \cdot (-\cos \phi_G) - \sin \phi_G + q] + \cos \psi \left[\cos \phi_G - \sin \phi_G \cdot (q - \phi_G) + 1 + \phi_G \cdot (q - 0,5 \cdot \phi_G) \right] \right\}. \quad (9)$$

Скорость деформации сдвига $\dot{\gamma}_\lambda$. В плоскости XZ скорость деформации сдвига определится выражением: $\dot{\gamma}_\lambda = \rho_\lambda^1 / R_\lambda$.

Радиус кривизны на годографе (рис. 2):

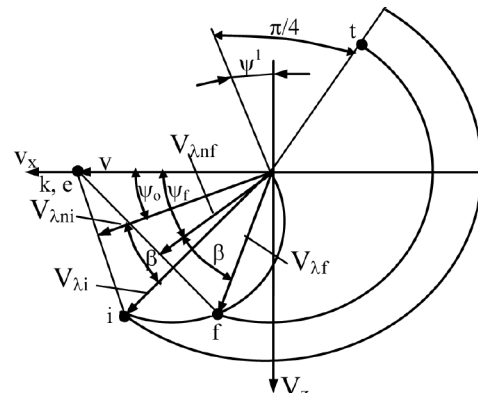


Рис. 2. Годограф скоростей в сечении XZ
 Fig. 2. Velocity hodograph in XZ section

$$\rho_\lambda^1 = v_\lambda = \frac{v_n}{\cos \beta} = \frac{v_x \cdot \cos \psi}{\cos \beta} = \frac{v \cdot \cos \psi}{\cos \beta \cdot \cos \delta},$$

а радиус кривизны в физической плоскости [15] на поверхности зерна: $R_{\lambda^0} = r \cdot \sin \beta$.

Окончательно скорость сдвига запишется в виде уравнения:

$$\dot{\gamma}_\lambda = \frac{v \cdot \cos \psi}{r \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot \cos \delta}. \quad (10)$$

Интенсивность деформации сдвига. При определении деформации предполагается, что любая точка на поверхности царапины в плоскости XZ сдвинута из положения ψ_0 в положение ψ_1 . При этом значения ψ_1 могут меняться в пределах $\psi_0 \leq \psi_1 \leq \pi/2$.

$$\gamma_i = \int_0^t \dot{\gamma}_i \cdot dt = \int_0^t \dot{\gamma}_i \cdot \frac{dL_\lambda}{v_\lambda} = \int_{\psi_0}^{\psi_1} \dot{\gamma}_i \cdot \frac{r \cdot \cos \delta \cdot \cos \beta}{\sin(\psi + \beta) \cdot v} \cdot d\psi, \quad (11)$$

где dL_λ – перемещение на линии тока за время dt , мм,

$$dL_\lambda = \frac{r \cdot \cos \psi \cdot d\psi}{\sin(\psi + \beta)}.$$

Подставляя поочередно уравнения (8) совместно с уравнениями (9) в формулу (2), а затем в выражение (10), получим интенсивность деформации на сферическом участке зерна:

$$\gamma_i = \frac{2}{3 \sin \beta} \int_{\psi_0}^{\psi_1} \frac{1}{\sin(\psi + \beta)} \sqrt{\cos^2 \psi (B^2 \cdot \cos \delta + B \cdot \cos \delta + 1) + \cos \psi \cdot [A \cdot B \cdot \sin 2\delta + A \cdot \sin \delta] + A^2 \cdot \sin^2 \delta} \cdot d\psi. \quad (12)$$

$$\text{Здесь } A = \frac{2 \cdot [(q - \phi_G) \cdot (-\cos \phi_G) - \sin \phi_G + q]}{\phi_G^2 \cdot (q - 2/3 \cdot \phi_G)} \quad \text{при } \gamma_G \leq \gamma_D \text{ для } \gamma_i;$$

$$B = \frac{2 \cdot [\cos \phi_G \cdot \sin \phi_G \cdot (q - \phi_G) + 1 + \phi_G \cdot (q - 0,5 \cdot \phi_G)]}{\phi_G^2 \cdot (q - 2/3 \cdot \phi_G)} \quad \text{при } \gamma_G \leq \gamma_D \text{ для } \gamma_i.$$

В уравнении (11) структура подынтегрального выражения:

$$J = \int_{\psi_0}^{\psi_1} \frac{1}{\sin(\psi + \beta)} \cdot \sqrt{\cos^2 \psi \cdot \lambda + \cos \psi \cdot \mu + \nu} \cdot d\psi.$$

В результате решения этого уравнения при допущении, что $\sin(\psi + \beta) \approx \sin \psi$, получены зависимости:

$$\gamma_i = \frac{2}{3 \cdot \sin \beta} \cdot [J(\psi_1) - J(\psi_0)]; \quad \lambda = B^2 \cdot \cos \delta + B \cdot \cos \delta + 1; \quad \mu = A \cdot B \cdot \sin^2 \delta + A \cdot \sin \delta; \quad \nu = A^2 \cdot \sin^2 \delta.$$

В уравнении (11) значение интеграла равно:

$$J(\psi_i) = \sqrt{\lambda \cdot \cos^2 \psi_i + \mu \cdot \cos \psi_i + \nu} \cdot \left[-\frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{\cos \psi_i + 1}{\cos \psi_i - 1} \right) - \frac{2\lambda}{3\nu \cdot \cos \psi_i} - \frac{\mu}{6\nu \cdot \cos^2 \psi_i} + \frac{\mu^2}{4\nu^2 \cdot \cos^2 \psi_i} \right] + \sqrt{\lambda} \ln \left(\frac{2\lambda \cos \psi_i + \mu}{2 \cdot \sqrt{\lambda}} + \lambda \cdot \cos^2 \psi_i + \nu \right) - \left(\frac{\mu}{2\sqrt{\nu}} + \frac{\mu^3}{8\nu^{5/2}} - \frac{\lambda \cdot \mu}{2\nu^{3/2}} \right) \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot \nu + \mu \cdot \cos \psi_i + 2 \cdot \sqrt{\nu \cdot (\lambda \cdot \cos^2 \psi_i + \mu \cdot \cos \psi_i + \nu)}}{\cos \psi_i} \right)$$

при $i = 1, 0$.

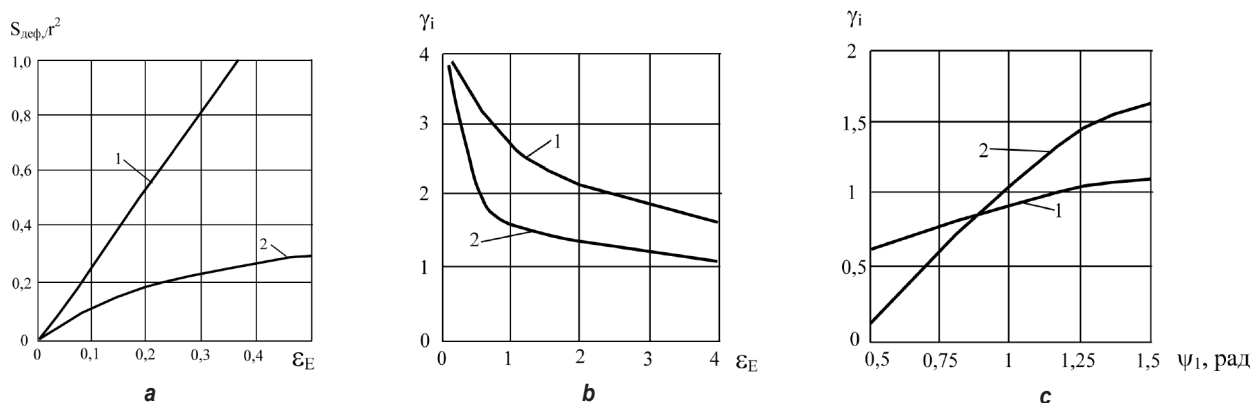


Рис. 3. Зависимость площади деформированного материала от глубины внедрения (а), а также интенсивности деформации от глубины внедрения (б) при $\psi_1 = \pi/2$ и угла охвата ψ_1 (с) при $\varepsilon_E = 4,3$:
 1 – при $\mu_m = 0$; 2 – при $\mu_m = 0,4$ ($\varphi_D = \pi/4$)

Fig. 3. Dependence of the area of the deformed material on the penetration depth (a), dependence of the deformation intensity on the penetration depth (b) at $\psi_1 = \pi/2$ and the angle of coverage ψ_1 (c) at $\varepsilon_E = 4.3$: 1 – at $\mu_m = 0$; 2 – at $\mu_m = 0.4$ ($\varphi_D = \pi/4$)

На рис. 3 приведены результаты расчета по уравнениям (6) для площади деформированного материала и уравнениям (11) для интенсивности деформации сдвига при различных значениях μ_m , ψ_1 , $\varepsilon_E = y/r$.

Заметим, что с увеличением коэффициента трения площадь деформированного материала в поперечном сечении царапины уменьшается (см. рис. 3 а), а интенсивность деформации этого материала изменяется не одинаково (см. рис. 3 б и с). Например, для $\varepsilon_E = 4,3$ при $\psi_1 > 0,75$ рад. γ_i растет, а при $\psi_1 < 0,75$ рад. – падает.

С учетом того, что пластическое деформирование материала в основном будет происходить при внедрении зерна, когда $\psi_1 \geq \pi/2$, судить о целесообразности увеличения или уменьшения коэффициента трения для повышения производительности процесса обработки следует из соотношения площади деформированного материала, интенсивности

деформации и усталостной прочности материала. Непредполагаемое большое значение интенсивности деформации сдвига, намного превосходящее деформацию материала при стандартных методах испытания, является характерным не только для царапания, но и для процесса резания вообще.

Многочисленные экспериментальные исследования пластической деформации в зоне стружкообразования, как отмечает Т.Н. Лолодзе [20], показывают, что значение относительной деформации в условной плоскости сдвига при резании пластичных материалов колеблется в пределах 2–10, тогда как в шейке при растяжении образцов эта величина меньше 1.

Съем материала в результате полидеформирования следует определять для конкретного способа абразивной обработки.

Упругая деформация материала. При действии единичного зерна под углом δ к по-

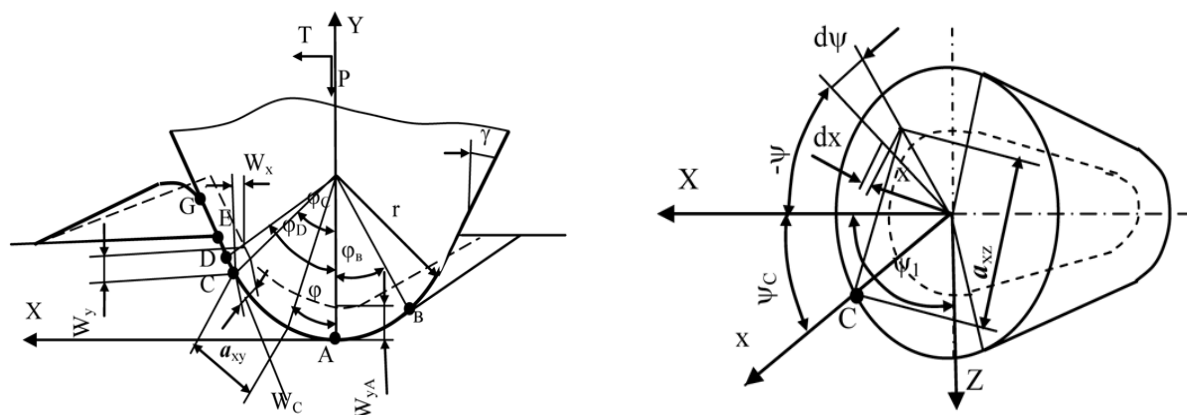


Рис. 4. Схема внедрения единичного зерна к расчету упругой деформации
 Fig. 4. Diagram of single grain introduction to elastic deformation calculation

верхности в материале, обладающем упруго-пластическими свойствами, образуется царапина, показанная на рис. 4 сплошной линией. После снятия нагрузки и упругого восстановления материала царапина принимает форму, изображенную на том же рисунке штриховыми линиями. Если на зерно снова приложить такую же нагрузку, что и до упругого восстановления, то царапина примет первоначальную форму.

Для любой точки С на поверхности зерна деформация dw_c под действием силы dP_n , приложенной на расстоянии a от рассматриваемой точки, может быть выражена:

$$dw_c = \frac{dP_n \cdot (1 - \mu_T^2)}{\pi \cdot E \cdot a} \quad (13)$$

Эта зависимость получена решением трехмерной задачи – задачи Бусинеска [11] при действии сосредоточенной силы на упругое полупространство.

Рассмотрим деформацию материала при внедрении зерна в пределах сферической части, т.е. при $y_G \leq y_D$.

На элементарную площадку поверхности зерна

$$dS = r^2 \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi \cdot d\psi \quad (14)$$

действует ортогональная к ней сила:

$$dP_n = \sigma_n \cdot \cos(\varphi_c - \varphi) \cdot \cos(\psi_c - \psi) \cdot dS, \quad (15)$$

где σ_n – напряжение, нормальное к поверхности зерна,

$$\begin{aligned} \sigma_n &= 2K \cdot (1 + \pi \cdot \psi_1 - \psi - \varphi - \varphi_{GS}) = \\ &= 2K \cdot (p_1 - \psi - \varphi), \end{aligned} \quad (16)$$

принимаемое для условий упругого восстановления без учета трения.

Расстояние от точки приложения силы до точки С, в которой определяется деформация:

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{a_{xy}^2 + a_{xz}^2} = \\ &= r \cdot \sqrt{\sin^2 \cdot (\phi_c - \phi) + \sin^2 \phi \cdot \sin^2 (\psi_c - \psi)} \end{aligned} \quad (17)$$

При анализе взаимодействия обрабатываемой частицы с обрабатываемой деталью упругая составляющая деформации используется в расчете только на этапе вытеснения, т.е. с того момента, когда кинетическая энер-

гия движения в нормальном к обрабатываемой поверхности направлении полностью израсходуется на пластическую и упругую деформации материала, а нормальная составляющая скорости обратится в нуль. Поэтому для расчета по уравнению (13) относительного движения частицы и детали на этом этапе взаимодействия достаточно знать нормальную составляющую деформации в точке А ($\varphi_c = 0$, $\psi_c = 0$):

$$dw_{yA} = \frac{(1 - \mu_T^2) \cdot dP}{\pi \cdot E \cdot a_A} \quad (18)$$

При внедрении в пределах сферической части зерна ($y_G \leq y_D$) на основе выражений (13)–(17) получим:

$$dP = 2 \cdot K \cdot r^2 \cdot (p - \psi - \varphi) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi \cdot d\psi; \quad (19)$$

$$a_A = r \cdot \sin \varphi. \quad (20)$$

Подставив выражения (19) и (20) в формулу (18) и проинтегрировав, получим:

$$\begin{aligned} w_{yA} &= \frac{4K \cdot r \cdot (1 - \mu_T^2)}{\pi \cdot E} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\phi_G} (p - \psi - \phi) \cdot \\ &\cdot \cos \phi \cdot d\phi \cdot d\psi = \frac{K \cdot r \cdot (1 - \mu_T^2)}{E} \cdot f_{yA}, \end{aligned}$$

где f_{yA} – безразмерная функция, зависящая от относительной глубины внедрения $\varepsilon = y/r$ и коэффициента трения μ_T ,

$$\begin{aligned} f_{yA} &= 2 \cdot [\sin \varphi_G \cdot (1 + 5/4 \cdot \pi - \varphi_{GS} - \varphi_G) + \\ &+ 1 - \cos \varphi_G]. \end{aligned} \quad (21)$$

На рис. 5 приведены рассчитанные по (21) значения функции f_{yA} в зависимости от относительной глубины внедрения при различных значениях коэффициента трения для $\gamma = \pi/4$.

Как и следовало ожидать, с увеличением глубины внедрения интенсивность роста этой функции падает. Особенно это заметно на сферической части зерна. Коэффициент трения, который отразился на функции f_{yA} через угол и высоту наплыва, оказывает на нее слабое влияние. Поэтому в практических расчетах, не требующих высокой точности, его влиянием можно пренебречь.

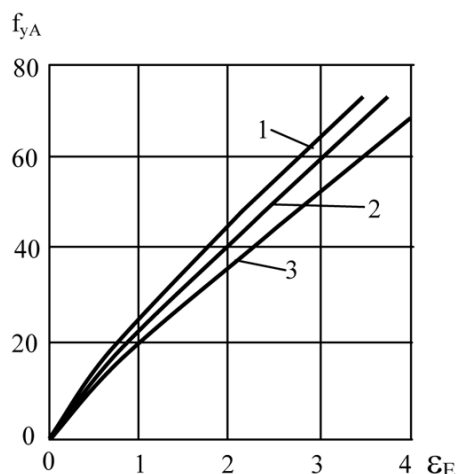


Рис. 5. Зависимость f_{yA} от глубины внедрения ϵ_E : 1 – при $\mu_T = 0$; 2 – при $\mu_T = 0,4$; 3 – при $\mu_T = 0,498$
 Fig. 5. f_{yA} vs penetration depth ϵ_E : 1 – at $\mu_T = 0$; 2 – at $\mu_T = 0,4$; 3 – at $\mu_T = 0,498$

Полученные уравнения упругой составляющей деформации на вершине зерна предназначены не только для анализа динамики взаимодействия обрабатываемой частицы с обрабатываемой деталью, но и определения параметров достижимой шероховатости поверхности, поскольку восстановленная глубина царапины тесно коррелирует с ее высотными параметрами.

Стружкообразование при действии единичного зерна. Площадь m_{kie} [15] является областью пластического равновесия (застойная зона), которая движется вместе с зерном как жесткое тело, образуя стружку.

Площадь поперечного сечения царапины, вытесненная в стружку, равна:

$$S_c = 2 \cdot r^2 \cdot \sin \varphi_0 \cdot (A_E - A_0) \text{ при } y_E \leq y_D, \quad (22)$$

где $A_E = 0,5 \varphi_E - 0,25 \sin 2 \varphi_E$; $A_0 = 0,5 \varphi_0 - 0,25 \sin 2 \varphi_0$.

Для подтверждения правильности полученных зависимостей были проведены эксперименты по царапанию материала индентором, представляющим собой модель единичного зерна, т.е. конус с закругленной вершиной.

Экспериментальные данные по этому показателю для ряда материалов в зависимости от относительной глубины внедрения $\epsilon = y/r$ приведены на рис. 6. Сходимость результатов, полученных теоретически (22) и экспериментально, как видно из графика, хорошая.

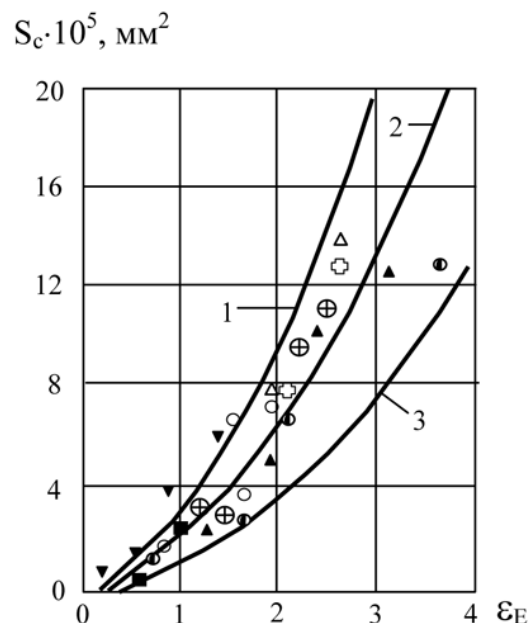


Рис. 6. Зависимость поперечного сечения стружки S_c от глубины внедрения:

1, 2, 3 – теоретические зависимости при $\gamma = \pi/4$, $r = 5 \text{ мкм}$ (1 – при $\mu_T = 0,498$; 2 – при $\mu_T = 0,4$; 3 – $\mu_T = 0,25$);

● – M1; ○ – Л62; ▲ – Д16Т; ◊ – ХВГ; ⊙ – steel 10; ■ – 60С2; ⊕ – Д19Т; ▼ – Х18Н10Т; Δ – АЕ – экспериментальные данные

Fig. 6. S_c chip cross section vs penetration depth: 1, 2, 3 – theoretical dependencies at $\gamma = \pi/4$, $r = 5 \mu\text{m}$ (1 – at $\mu_T = 0,498$; 2 – at $\mu_T = 0,4$; 3 – $\mu_T = 0,25$);

● – M1; ○ – Л62; ▲ – Д16Т; ◊ – ХВГ; ⊙ – steel 10; ■ – 60С2; ⊕ – Д19Т; ▼ – Х18Н10Т; Δ – АЕ – experimental data

Нормальная и тангенциальная составляющие силы P и T при царапании, измеренные на склерометре при $\gamma = \pi/4$, $r = 5 \text{ мкм}$, $\delta = 0$ и $\mu_T = 0,4$, представим в виде безразмерных функций t_p и t_T . Они рассчитаны по уравнениям:

$$t_p = \frac{P}{K \cdot r^2} \text{ и } t_T = \frac{T}{K \cdot r^2}$$

и приведены на рис. 7.

Подтверждение теоретических зависимостей экспериментальными данными говорит о том, что научная концепция математической модели для определения объема материала, пластически деформированного при воздействии единичного зерна, верна и может быть использована при разработке модели съема материала абразивосодержащим инструментом.

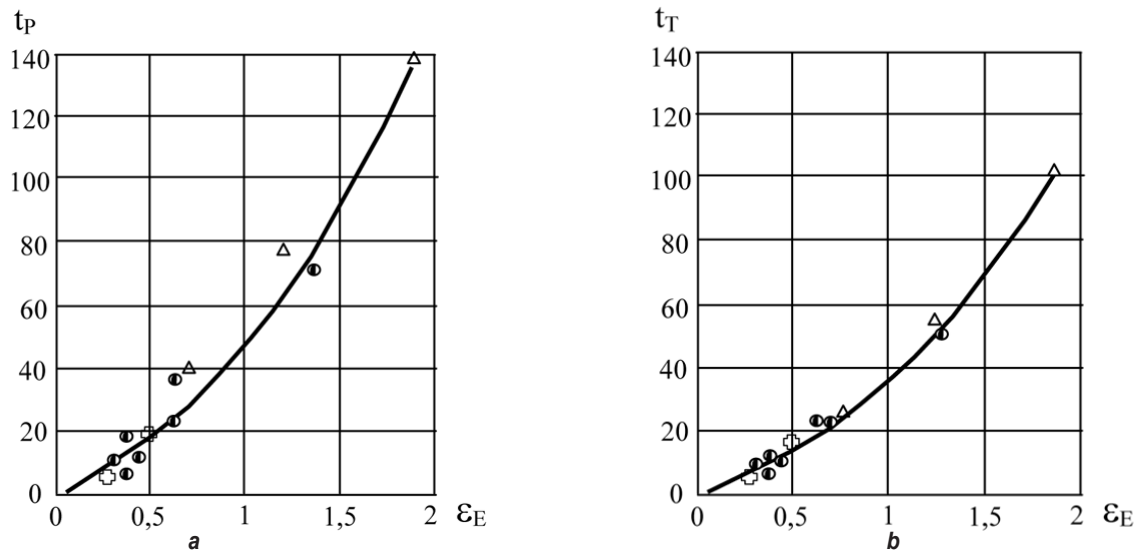


Рис. 7. Зависимость безразмерных функций t_p (a) и t_m (b) от глубины внедрения при $\gamma = \pi/4$, $r = 5$ мкм (условные обозначения материалов те же, что и на рис. 6)
 Fig. 7. a – t_p and b – t_m dimensionless functions vs penetration depth at $\gamma = \pi/4$, $r = 5$ μm
 (conventional symbols of materials are similar to those in Fig. 6)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные методом линий скольжения, позволили определить объем пластически деформированного материала, величины и скорости деформации при действии единичного зерна, объем удаленного материала в результате многократного пластического деформирования и в виде стружки.

Исследование упругой деформации материала заготовки и восстановления царапины

после снятия нагрузки позволяют определить высотные параметры шероховатости.

Результаты аналитических исследований подтверждены экспериментальными данными.

Проведенные исследования являются составной частью исследования производительности процесса и шероховатости обработанной поверхности при финишной обработке заготовок эластичными полимерно-абразивными инструментами и свободными абразивными частицами.

Список источников

1. Li Ning, Ding Jinfu, Hu Liguang, Wang Xiao, Lu Lirong, Huang Jianmeng, et al. Preparation, microstructure and compressive properties of silicone gel/SiC composites for elastic abrasive // *Advanced composites letters*. 2018. Vol. 27. Iss. 3. P. 122–128. <https://doi.org/10.1177/096369351802700305>.
2. Dimov Yu.V., Podashev D.B. Machining forces exerted by an elastic abrasive wheel // *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38. Iss. 12. P. 932–937. <https://doi.org/10.3103/s1068798x18120341>.
3. Soloviev A.N., Tamarkin M.A., Tho Nguyen Van. Finite element modeling method of centrifugally rotary processing // *Applied Mechanics and Materials*. 2019. Vol. 889. P. 140–147. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-214-220>.
4. Solovev A.N., Nguyen Van Tho, Tamarcin M.A., Panfilov I.A., Wang J.P. Modeling contact abrasive interactions in centrifugally rotary processing by finite element method // *Physics and Mechanics of new Materials and their Applications* (Busan, 9–11 August 2018). Busan: Korea Maritime and Ocean University, 2018. P. 334–336. EDN: XYXAVF.
5. Svirschev V.I., Trubitsyn A.V., Tarasov S.V. Technological support of the surface roughness of the spigots made from the tough Relit material with the help of the optimization of the centerless grinding mode parameters // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2019. Vol. 14. № 4. P. 896–899.
6. Spirin V.A., Makarov V.F., Khalturin O.A. Calculation of thermodynamic parameters of geometrically complex parts at abrasive globoid gear machining // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering*. Sochi: Springer, 2020. Vol. 2. P. 857–864. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_91. EDN: UVZNKU.
7. Сви́рщев В.И., Трубицын А.В., Тарасов С.В. Оптимизация параметров режима бесцентрового шлифования втулок из высокотвердого материала «Релит», обеспечивающих требуемую шероховатость поверхности // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2019. Т. 21. № 1. С. 25–30.
8. Нгуен Ван Тхо, Тищенко Э.Э., Панфилов И.А., Мордовцев А.А. Исследование влияния технологических параметров на съём металла при центробежно-ротационной обработке // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2020. Т. 20. № 4. P. 397–404. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-4-397-404>.

9. Макаров В.Ф., Ворожцова Н.А., Песин М.В. Обработка зубчатых колес сборными шлифовально-полировальными кругами // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Серия: Машиностроение, материаловедение*. 2020. Т. 22. № 1. С. 79–87. <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2020.1.09>.
10. Спиринов В.А., Макаров В.Ф., Халтурин О.А. Производительность глобидного зубохонингования // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2020. № 3. С. 20–23. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-3-20-23>. EDN: IBVLVR.
11. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Машиностроение, 1974. 280 с.
12. Петросов В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента. М.: Машиностроение, 1977. 166 с.
13. Томленов А.Д. Некоторые задачи пластического формообразования металлов // *Прочность металлов и конструкций: сб. статей*. Киев: Академперіодика, 1975. С. 196–201.
14. Дударев А.С., Карманов В.В., Свирщев В.И. Моделирование формы единичного алмазного зерна // *Современное машиностроение. Наука и образование*. 2018. № 7. С. 545–557. <https://doi.org/10.1872/MMF-2018-47>. EDN: XRIAOL.
15. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Сила резания на единичном зерне // *iPolytech Journal*. 2023. Т. 27. № 1. С. 10–22. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-10-22>.
16. Друянов Б.А. О движении цилиндрического индентора по поверхности полупространства // *Теория трения и износа: сб. статей*. М.: Наука, 1965. С. 62–72.
17. Абрамян Б.Л., Александров В.М., Аменадзе Ю.А. Развитие теории контактных задач в СССР. М.: Наука, 1976. 493 с.
18. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. М.: Металлургия, 1972. 408 с.
19. Крагельский И.В., Харач Г.М. О расчете износа поверхностей трения // *Расчетные методы оценки трения и износа: сб. статей*. Брянск: Приокское книжное изд-во, 1975. С. 5–17.
20. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. 320 с.

References

1. Li Ning, Ding Jinfu, Hu Liguang, Wang Xiao, Lu Lirong, Huang Jianmeng, et al. Preparation, microstructure and compressive properties of silicone gel/SiC composites for elastic abrasive. *Advanced composites letters*. 2018;273:122-128. <https://doi.org/10.1177/096369351802700305>.
2. Dimov Y.V., Podashev D.B. Machining forces exerted by an elastic abrasive wheel. *Russian Engineering Research*. 2018;38(12):932-937. <https://doi.org/10.3103/s1068798x18120341>.
3. Soloviev A.N., Tamarkin M.A., Tho Nguyen Van. Finite element modeling method of centrifugally rotary processing. *Applied Mechanics and Materials*. 2019;889:140-147. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-214-220>.
4. Soloviev A.N., Nguyen Van Tho, Tamarcin M.A., Panfilov I.A., Wang J.P. Modeling contact abrasive interactions in centrifugally rotary processing by finite element method. In: *Physics and Mechanics of new Materials and their Applications*. 9–11 August 2018, Busan. Busan: Korea Maritime and Ocean University; 2018, p. 334-336. EDN: XYXAVF.
5. Svirschev V.I., Trubitsyn A.V., Tarasov S.V. Technological support of the surface roughness of the spigots made from the tough Relit material with the help of the optimization of the centerless grinding mode parameters. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2019;14(4):896-899.
6. Spirin V.A., Makarov V.F., Khalturin O.A. Calculation of thermodynamic parameters of geometrically complex parts at abrasive globoid gear machining. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering*. Sochi: Springer; 2020, vol. 2, p. 857-864. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_91. EDN: UVZSKU.
7. Svirshchev V.I., Trubitsyn A.V., Tarasov S.V. Technological support of the surface roughness of the spigots made of high-hard material "Relit" based on the optimization of the parameters of the centerless grinding mode. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019;21(1):25-30. (In Russ.).
8. Nguyen Van Tho, Tischenko E.E., Panfilov I.A., Mordovtsev A.A. Investigation of technological parameters effect on metal removal during centrifugal rotary machining. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2020;20(4):397-404. (In Russ.). <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-4-397-404>.
9. Makarov V.F., Vorozhtsova N.A., Pesin M.V. Processing gears with prefabricated grinding and polishing wheels. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University*. 2020;22(1):79-87. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2020.1.09>.
10. Spirin V.A., Makarov V.F., Khalturin O.A. Capacity of globoidal gear-honing. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2020;3:20-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-3-20-23>. EDN: IBVLVR.
11. Korchak S.N. *Steel part grinding rate*. Moscow: Mashinostroenie; 1974, 280 p. (In Russ.).
12. Petrosov V.V. *Hydroblasting hardening of parts and tools*. Moscow: Mashinostroenie; 1977, 166 p. (In Russ.).
13. Tomlenov A.D. Some issues of plastic shaping of metals. In: *Prochnost' metallov i konstrukcij = Strength of metals and structures*. Kiev: Akademperіodika; 1975, p. 196-201. (In Russ.).
14. Dudarev A.S., Karmanov V.V., Svirshchev V.I. Modeling a single diamond grain shape. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*. 2018;7:545-557. (In Russ.). <https://doi.org/10.1872/MMF-2018-47>. EDN: XRIAOL.
15. Dimov Yu.V., Podashev D.B. Force of cutting by a single abrasive grain. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):10-22. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-10-22>.
16. Druyanov B.A. On cylindrical indenter motion along the half-space surface. In: *Teoriya treniya i iznosa = Theory of*

Friction and Wear. Moscow: Nauka, 1965, p. 62-72. (In Russ.).

17. Abramyan B.L., Aleksandrov V.M., Amenadze Yu.A. *Contact problem theory development in the USSR*. Moscow: Nauka; 1976, 493 p. (In Russ.).

18. Tomlenov A.D. *Theory of plastic deformation of metals*. Moscow: Metallurgiya; 1972, 408 p. (In Russ.).

19. Kragelsky I.V., Kharach G.M. On friction surface wear calculation. In: *Raschetnye metody ocenki treniya i iznosa = Calculation methods to estimate friction and wear*. Bryansk: Priokskoe book publishing house; 1975, p. 5-17. (In Russ.).

20. Loladze T.N. *Cutting tool strength and wear resistance*. Moscow: Mashinostroyeniye; 1982, 320 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Димов Юрий Владимирович,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры конструирования
и стандартизации в машиностроении,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ dimov-ura@yandex.ru

Yury V. Dimov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Mechanical Engineering
Design and Standardization,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ dimov-ura@yandex.ru

Подашев Дмитрий Борисович,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры конструирования и стандартизации
в машиностроении,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
dbp90@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9112-9253>

Dmitry B. Podashev,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mechanical
Engineering Design and Standardization,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
dbp90@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9112-9253>

Вклад авторов

Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Information about the article

Статья поступила в редакцию 18.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 02.09.2023 г.; принята к публикации 15.12.2023 г.

The article was submitted 18.07.2023; approved after reviewing 02.09.2023; accepted for publication 15.12.2023.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.01:621.9.01

EDN: ILMNVU

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-21-30



Формальный метод выбора черновых баз с использованием графов размерных связей при механической обработке деталей

Ф.Ю. Игнатьев¹✉¹Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

Резюме. Цель – определение формальных условий выбора черновых баз и правил задания связей между поверхностями заготовки и поверхностями детали, обрабатываемой на металлорежущих станках. Основой исследования является геометрия неидеальных объектов, представляющая геометрическую конфигурацию детали или заготовки в виде множества поверхностей (S), расположенных в строгом соответствии с набором линейных и угловых размерных связей (V) в шестимерном геометрическом пространстве. Представление размерных связей в каждом из шести измерений выполнялось с использованием теории графов. При моделировании процесса последовательной обработки поверхностей использован алгоритм, описанный в работах В.Г. Старостина и В.Е. Лелюхина. Рассмотрен вопрос выбора черновых баз, где критерием выбора установлена возможность формального (автоматического) формирования последовательности обработки поверхностей детали без перерасчета размерных цепей, заданных на чертеже. Показано, что установленный критерий позволяет избежать существенного «ужесточения» допусков и увеличения производственных затрат, а также является гарантией сохранения исходной конструкции детали. Проведенные исследования графов размерных связей позволили выявить и сформулировать правила выбора черновых баз и условия их связи с комплексом поверхностей детали. На примере представления геометрического образа детали и заготовки в шестимерном пространстве с двумя метриками (линейная и угловая) подробно показан процесс формального определения поверхностей, используемых в качестве баз на каждом шаге обработки. По результатам выполненных исследований предложен формальный метод выбора черновых баз, принципиальным условием которого является наличие заданных на чертеже размерных связей между поверхностями заготовки и детали в трех угловых измерениях. Изложенные материалы являются частью комплексных исследований, выполняемых для решения проблемы создания систем автоматического формирования технологических процессов изготовления деталей.

Ключевые слова: машиностроение, изготовление деталей, металлорежущие станки, технологический процесс, технологические базы, последовательность обработки

Для цитирования: Игнатьев Ф.Ю. Формальный метод выбора черновых баз с использованием графов размерных связей при механической обработке деталей // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 21–30. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-21-30>. EDN: ILMNVU.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Formal method for selecting rough datum in part machining using graphs of dimensional relationships

Fedor Yu. Ignatiev¹✉¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Abstract. We set out to determine formal conditions for selecting rough datum surfaces and rules for specifying the relationships between the surfaces of the workpiece and the part machined by metal-cutting equipment. The research was based on the geometry of non-ideal objects, which represents the geometric configuration of the part or workpiece in the form of a set of surfaces (S) arranged in strict accordance with a set of linear and angular dimensional relationships (V) in a six-dimensional geometric space. The representation of dimensional relationships in each of the six dimensions was performed using graph theory. The algorithm described in the works of V.G. Starostin and V.E. Lelyukhin was used for modeling the process of sequential surface machining. The question of selection of rough datum surfaces was considered. Here, the selection criterion is the possibility of automatic formation of machining sequence without recalculation of the dimension chains defined in the drawing. This criterion eliminates the problem of significant toughening of tolerances and additional

production costs. Moreover, this criterion ensures preservation of the original design of the part. The conducted studies of the graphs of dimensional relationships allowed us to formulate rules for selecting rough datum surfaces and conditions for their connection with the set of part surfaces. The representation of a geometrical image of the part and the workpiece in a six-dimensional space with two metrics (linear and angular) was used to demonstrate the process of formal definition of surfaces used as datum surfaces at each machining step. The results obtained served as the basis for developing a formal method of datum surface selection, whose principal condition consists in the presence of dimensional relationships between the surfaces of the workpiece and the part in three angular dimensions specified in the drawing. The presented materials are part of an ongoing research project into the creation of automated systems for technological machining processes.

Keywords: mechanical engineering, part manufacturing, metal-cutting machines, technological process, technological bases, cutting sequence

For citation: Ignatiev F.Yu. Formal method for selecting rough datum in part machining using graphs of dimensional relationships. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):21-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-21-30>. EDN: ILMNVU.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос автоматизации проектирования технологических процессов является актуальным на сегодняшний день. Специалисты занимаются его изучением на протяжении большого количества времени, но наличие определенных трудностей не позволяет найти совершенное решение. Автоматизация проектирования технологических процессов работает на основе использования прошлого опыта, классификации деталей по конструктивным и технологическим признакам. В изучении вопроса автоматизации в Российских источниках можно выделить типовые, модульные и единичные подходы проектирования технологических процессов² [1–4]. Разработка единичного технологического процесса подразумевает создание технологического процесса изготовления изделия одной геометрической конфигурации. К преимуществу единичного технологического процесса можно отнести возможность учета особенностей изделия и эффективное применение производственных возможностей. К недостаткам – большие затраты времени. В основе типового технологического процесса заложено использование готового технологического процесса для геометрически подобной рассматриваемой детали. Применение типового технологического процесса позволяет сократить время на разработку технологических процессов. Использование данного метода проектирования позволило создать системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), таких как «Вертикаль», «Спрут ТП» и другие [5, 6]. В зарубежных источниках используются подходы на основе

типовых технологических процессов. Можно выделить два подхода: модифицированный (вариантный) и генеративный [7, 8]. Модифицированный (вариантный) метод основан на поиске в базе данных типового технологического процесса и модификации его технологии под рассматриваемую деталь. Генеративный метод основан на создании технологических процессов с нуля с помощью имеющихся инструментов (искусственного интеллекта, нейронных сетей др.).

Полностью автоматизировать проектирование технологических процессов не позволяет существование определенных проблем. Одной из них является отсутствие возможности передачи полной информации о детали между людьми, работающими на разных этапах изготовления. Зачастую заложенные в процессе конструирования размерные связи между поверхностями детали не дают полного понимания для формирования технологии изготовления.

Важными составляющими факторами при проектировании технологического процесса являются определение и выбор заготовки. На всем этапе изготовления изделия этим вопросом занимается ряд специалистов, конструктор определяет марку материала и геометрическую конфигурацию, которые в дальнейшем могут меняться в зависимости от наличия и выбранного технологом способа обработки. Геометрические параметры заготовки должны позволять вписать в нее деталь, а размерные связи между поверхностями заготовки и детали должны дать возможность построить последовательность обработки поверхностей детали. Однако на практике в подавляющем

²Жуков Э.Л., Козарь И.И., Розовский Б.Я., Дегтярев В.В., Соловейчик А.М. Технология машиностроения.

Часть II. Проектирование технологических процессов: учеб. пособие. СПб. Изд-во СПбГТУ, 2000. 498 с.

³Колесов И.М. Основы технологии машиностроения: учеб. для машиностроит. спец. вузов. 3-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2001. 591 с.

большинстве чертежей набор размерных связей между поверхностями заготовки и детали недостаточен для однозначного определения их взаимной ориентации³ [9]. При этом существенно важным является выбор первых черновых поверхностей [10, 11]. Неправильно подобранные черновые базирующие поверхности (поверхности заготовки) зачастую приводят к ситуации, когда соблюдение размерной цепи, заложенной конструктором, невозможно. Решением этой проблемы, чаще всего применяемой в практике, является изменение связей между поверхностями и, как результат этого, пересчет допуска, что в свою очередь приводит к увеличению себестоимости, ужесточению допусков, изменению конструкции.

Проблема в данном случае заключается в выборе такого комплекта черновых баз, который позволял бы получить технологию изготовления детали без пересчета допусков.

ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение условий выбора черновых баз и правил задания связей между поверхностями заготовки (черновыми базами) и комплексом поверхностей детали для формального получения последовательности обработки всех поверхностей детали без перерасчета размерных связей и допусков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основы для рассмотрения процесса проектирования последовательности обработки поверхностей детали в статье используется алгоритм автоматического проектирования технологического процесса механической обработки деталей, разработанный В.Г. Старостиным и В.Е. Лелюхиным [12].

Продолжение исследований в этом направлении привело к созданию геометрии неидеальных объектов, разрабатываемой В.Е. Лелюхиным и О.В. Колесниковой [13, 14]. Данные исследования позволяют изучить положение и ориентацию объектов в шестимерном пространстве. Положения геометрии дают возможность однозначно описать конструкцию и процесс порождения исследуемого объекта в этом пространстве. В качестве базиса шестимерного пространства выступает объединение трех линейных и трех угловых векторов. Объект представляет собой

совокупность поверхностей и размерных связей между ними $G(S, V)$, где $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ – поверхности, ограничивающие объект, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, $v_i = (s_j, s_k)$ – размерные связи между поверхностями. Таким образом, при рассмотрении детали с помощью геометрии неидеальных объектов необходимо представить объект в виде совокупности элементарных поверхностностей (сфера, цилиндр, плоскость), ограничивающих этот объект, и построить графы размерных связей. На рис. 1 показан чертеж детали.

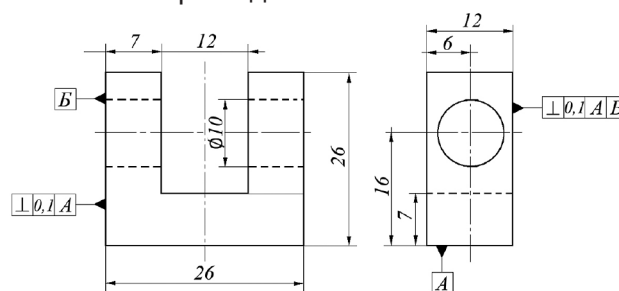


Рис. 1. Чертеж детали
 Fig. 1. Part drawing

Рассмотрим модель детали, представленной на чертеже (см. рис. 1). Для выполнения формального описания данной детали пронумеруем в произвольном порядке ее поверхности. Пример модели детали с пронумерованными поверхностями представлен на рис. 2 а.

Итак, геометрия неидеальных объектов рассматривает деталь в шести степенях свободы, в трех линейных направлениях $\vec{l}_x, \vec{l}_y, \vec{l}_z$ (перемещение вдоль координатных осей) и трех угловых $\vec{\alpha}_x, \vec{\alpha}_y, \vec{\alpha}_z$ (повороты вокруг координатных осей).

В каждом из линейных и угловых направлений необходимо рассмотреть размерные связи поверхностей и построить графы размерных связей. В графах размерных связей в качестве вершин выступают поверхности детали, а ребра показывают наличие размерной связи между поверхностями. Так, в направлении $\vec{l}_x$, на чертеже указаны размерные связи между плоскостями 3 и 4 – 26 мм, 3 и 8 – 7 мм, 8 и 9 – 12 мм. Соответственно, граф размерных связей в этом направлении будет выглядеть как показано на рис. 2 б.

Аналогично на основании пронумерованных поверхностей и указанных на чертеже размеров можно построить остальные графы размерных связей, как показано на рис. 2 б.

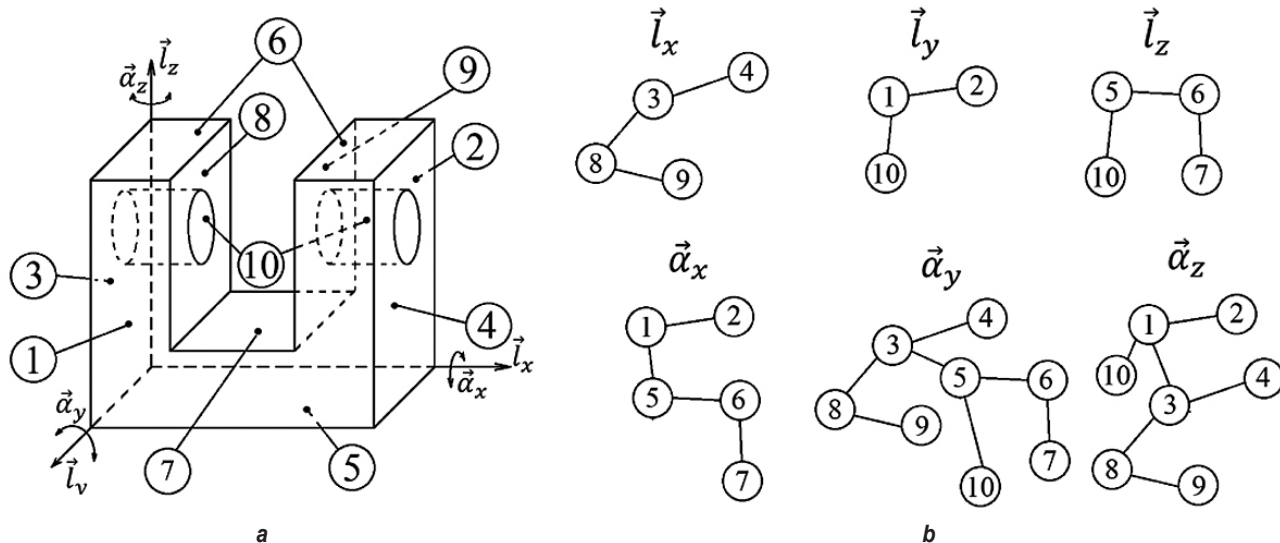


Рис. 2. Деталь с пронумерованными поверхностями (а) и соответствующие ей графы размерных связей (б)

Fig. 2. A part with numbered surfaces (a) and corresponding dimensional relationship graphs (b)

При обработке деталей на станках базирование решает задачу обеспечения взаимного расположения поверхностей (ВРП) относительно друг друга. В соответствии с действующим в нашей стране ГОСТ 2.307-2011⁴ «основанием для определения требуемой точности изделия при изготовлении являются указанные предельные отклонения размеров, а также предельные отклонения формы и расположения поверхностей». Следовательно, выбор баз полностью определяется заданными на чертеже размерными связями между поверхностями детали⁵. Тогда теоретической основой для формализации выбора баз могут служить свойства и закономерности существования размерных связей между поверхностями, указанные на чертеже⁶.

Традиционно процесс технологического проектирования начинается с разработки формы и размеров заготовки и выбора черновых баз [15]. При этом в технологической практике можно рассматривать два случая.

В первом случае, когда на чертеже изготавливаемой детали (кроме обрабатываемых поверхностей) имеется комплекс «черновых» поверхностей, не подвергающихся обработке, в соответствии с регламентами ЕСКД конструктор вынужден определять размерные

связи между исходными поверхностями заготовки и обрабатываемыми поверхностями готовой детали.

Ситуация усложняется во втором случае – для деталей, у которых весь комплекс поверхностей подвергается механической обработке. В этой ситуации при подготовке производства детали реально имеем как минимум два чертежа: а) чертеж детали («чистовые» поверхности и размерные связи между ними), который разрабатывается конструктором и б) чертеж заготовки («черновые» поверхности и размерные связи между ними), разрабатываемый технологом. Следует отметить, что в отечественной и зарубежной литературе отсутствуют однозначные правила и регламенты геометрического связывания заготовки и детали.

В обоих этих случаях как собственно проектирование заготовки, так и определение размерных связей, обеспечивающих взаимную ориентацию «чистовых» и «черновых» поверхностей, выполняется на этапе технологического проектирования. В качестве инструмента технологу предлагается комплекс рекомендаций выбора черновых поверхностей, которые в обобщенном виде можно свести к следующим [16–18]:

⁴ГОСТ 2.307-2011. Единая система конструкторской документации. Нанесение размеров и предельных отклонений. Введ. 01.01.2012. М.: Стандартинформ, 2020.

⁵ГОСТ 2.307-2011. ЕСКД. Нанесение размеров и предельных отклонений. М.: Стандартинформ, 2020.

⁶Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения: учебник. 3-е изд., доп. М.: Машиностроение, 1969. 561 с.

- возможно использование не более трех черновых поверхностей, имеющих связи с поверхностями детали;
- каждую черновую поверхность можно использовать только один раз;
- базирующие точки черновых поверхностей не должны дублироваться, т.е. для ограничения каждой степени свободы должно быть не более одной точки.

Отечественная и зарубежная практика свидетельствует, что построить формальный механизм выбора черновых баз на основе указанных рекомендаций не удается.

Попытка формализовать выбор на основе использования заданных размерных связей наталкивается на проблему нестабильной разрешимости. Как показали проведенные исследования, не все возможные комбинации линейных и угловых размерных связей обеспечивают формальную разрешимость задачи [19].

Под разрешимостью в статье понимается существование не менее одного варианта последовательности обработки всех «чистовых» поверхностей при условии, что каждая обрабатываемая («чистовая») непосредственно связана с базирующим комплексом. При этом основным условием для формального выбора баз и определения схем базирования является использование только размерных связей, указанных на чертеже (без перерасчета размерных цепей)^{7,8}.

Формирование черновых баз рассмотрим на примере. Для рассматриваемой детали (рис. 2 а) используется заготовка, имеющая геометрическую форму в виде призмы (рис. 3 а).

Важным условием является необходимость «вписать» деталь в тело заготовки и расположить ее там так, чтобы в процессе изготовления детали геометрические погрешности заготовки не влияли на геометрию будущего изделия.

Геометрическая конфигурация заготовки, как и изготавливаемой детали, определяется набором поверхностей и размерных связей $G^z (S^z, V^z)$. Каждая из поверхностей заготовки

(S^z) потенциально может быть использована в качестве базирующей. Важным фактором выбора черновых баз будет как раз задание связей между черновым комплексом поверхностей заготовки (геометрическим образом заготовки $G^z (S^z, V^z)$) и набором поверхностей детали (геометрическим образом детали $G (S, V)$).

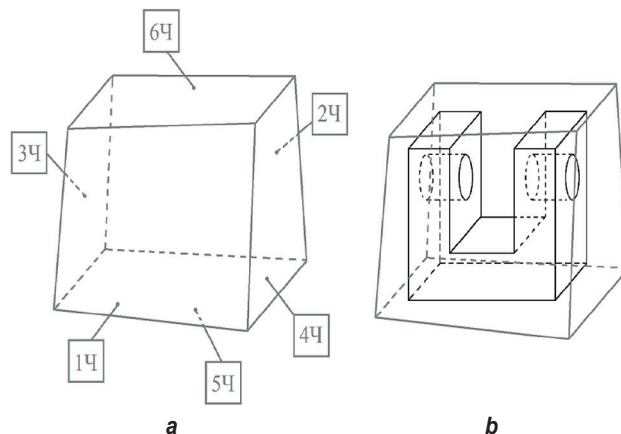


Рис. 3. Заготовка с обозначенными поверхностями (а) и деталь, вписанная в заготовку (b)
 Fig. 3. A workpiece with marked surfaces (a) and a part inscribed in the workpiece (b)

Основным положением рассматриваемого подхода к проектированию баз и схем базирования является наличие необходимого и достаточного количества размерных связей, определяющих относительное расположение всех ее поверхностей [20]. Формально это выражается в связности и ацикличности графов размерных связей по трем линейным ($\vec{l}_x, \vec{l}_y, \vec{l}_z$) и трем угловым ($\vec{\alpha}_x, \vec{\alpha}_y, \vec{\alpha}_z$) координатам. Проектирование процесса обработки детали выполняется с использованием алгоритма, описанным в работах [21].

Вернемся к примеру. Так как на чертеже (см. рис. 1) не указаны связи поверхностей детали с черновыми, проставим их самостоятельно.

Графы размерных связей с добавлением черновых поверхностей показаны на рис. 4. Соблюдая условия выбора черновых поверхностей, получаем, что у поверхности 1Ч будет три базирующих точки $\vec{\alpha}_x, \vec{l}_y, \vec{\alpha}_z$; 3Ч – две базирующих точки $\vec{l}_x$; α_y и 5Ч – одна $\vec{l}_z$.

⁷Леонтьев Л.Б., Лелюхин В.Е., Колесникова О.В., Леонтьев А.Л. Системное проектирование технологических процессов изготовления и восстановления деталей машин: учебное пособие. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2020. 400 с. EDN: ATPHOR.

⁸Косилов А.Г., Мещеряков Р.К. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 656 с.

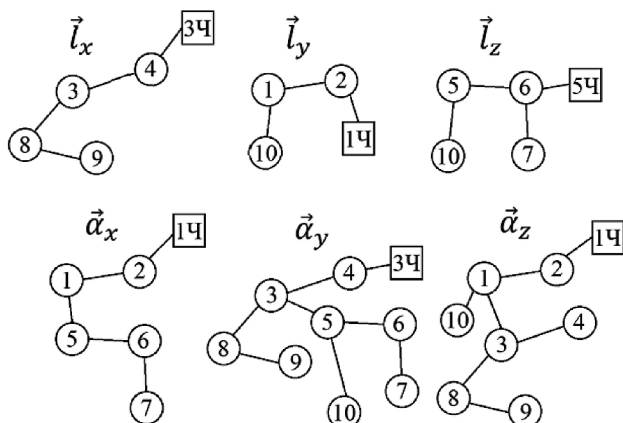


Рис. 4. Графы размерных связей с проставленными черновыми поверхностями

Fig. 4. Graphs of dimensional relationships with marked rough surfaces

Процесс проектирования заключается в следующем. В ходе анализа детали необходимо пронумеровать произвольным образом все ее будущие поверхности, соответствующие чертежу, и реальные (существующие) поверхности заготовки. На основе существующих размерных связей строятся графы размерных связей и матрица смежности, где каждая строка матрицы формально описывает взаимосвязи соответствующей поверхности с другими поверхностями (0 – отсутствие связи, 1 – наличие связи по соответствующему направлению $\vec{l}_x, \vec{l}_y, \vec{l}_z, \vec{a}_x, \vec{a}_y, \vec{a}_z$) (рис. 5 а).

Каждая поверхность в матрице смежности представлена в виде шестиклеточной таблицы, формально описывающей с помощью 0 (отсутствие) и 1 (наличие) ограничения свободы по направлениям ($\vec{l}_x, \vec{l}_y, \vec{l}_z, \vec{a}_x, \vec{a}_y, \vec{a}_z$) для задания ее положения (пример шестиклеточной таблицы для поверхности 1Ч показан на рис. 5 б).

После построения матрицы смежности проводится анализ наличия совпадений шестиклеточных таблиц существующих поверхностей с поверхностями, которые нужно обработать (несуществующие). Наличие совпадения означает, что поверхность можно обработать, используя существующую поверхность в качестве базы (как показано на рис. 5 а, поверхности 1Ч и 2 имеют одинаковые базисные точки). Затем строка обработанной поверхности переносится в верхнюю часть таблицы, столбец удаляется и поверхность считается обработанной. Далее продолжается поиск совпадений в верхней части таблицы с поверхностями, которые еще не обработаны. Перенос всех поверхностей в статус существующих означает, что все поверхности детали обработаны.

Множество проведенных модельных экспериментов с представленной конфигурацией и выбором различных базисных поверхно-

		1	2	3	4	5	6
существующие поверхности	1Ч		0 1 0 1 0 1				
	5Ч						0 0 1 0 0 0
	3Ч				1 0 0 0 1 0		
несуществующие (необработанные) поверхности	1	0 1 0 1 0 1	0 1 0 1 0 1	0 0 0 0 0 1		0 0 0 1 0 0	
	2	0 1 0 1 0 1	0 1 0 1 0 1				
	3	0 0 0 0 0 1		1 0 0 0 1 1	1 0 1 0 1 1	0 0 0 0 1 0	
	4						
	5						
	6						

a
b

X Y Z

l

0	1	0
1	0	1

α

Рис. 5. Фрагмент матрицы смежности (а) и шестиклеточная таблица поверхности 1Ч (б)

Fig. 5. A fragment of the adjacency matrix (a) and a six-cell table of the 1Ч surface (b)

стей показало, что рассматриваемый пример не дает возможности провести обработку детали без перерасчета размерных связей и допусков. Различные комбинации наборов базировочных точек выбранных черновых поверхностей также не приводят к получению последовательности обработки всех поверхностей детали. Во всех случаях для дальнейшей обработки необходимо изменение размерной цепочки и перерасчет допусков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования в этом вопросе и многочисленные модельные эксперименты позволили сформулировать условия, гарантирующие сходимость алгоритма последовательной обработки поверхностей детали в отношении построения последовательности обработки, включающей все обрабатываемые поверхности.

В процессе исследований было отмечено, что особое внимание необходимо уделить графам угловых размерных связей, так как именно они отвечают за возможность смены линейных направлений обработки. Так, например, чтобы после обработки горизонтальной плоскости перейти к обработке вертикальной, необходимо наличие между ними заданной угловой размерной связи. Для полной обработки всей детали необходимо наличие заданных угловых связей между всеми линейными направлениями, т.е. граф связей угловых измерений. Данный граф может быть получен симметрической разностью графов угловых направлений.

Если рассмотреть исследуемый пример (см. рис. 4), можно заметить, что условие наличия связей между поверхностями в угловых направлениях, образующих граф связей угловых измерений, выполняется. Имеются связи между поверхностями 1 и 5 в направлении $\vec{\alpha}_x$, между 3 и 5 в направлении $\vec{\alpha}_y$ и связи между 1 и 3 поверхностями в направлении $\vec{\alpha}_z$.

Наличие графа связей угловых измерений позволяет сформулировать **правила выбора черновых баз**:

Вершины графов угловых связей, входящих в начальный комплект баз (поверхности заготовки) должны иметь непосредственную связь с вершинами, образующими граф связей угловых измерений (рис. 7).

Если одна из вершин графа размерных связей, входящих в начальный комплект баз (по-

верхности заготовки), не имеет непосредственной связи с вершинами, образующими граф связей угловых измерений, то обработка должна начинаться именно с этой поверхности.

В рассматриваемом примере (см. рис. 4) выбор черновых поверхностей и связи с поверхностями, входящими в граф связей угловых измерений, не соответствуют сформулированным правилам. Поэтому были заново подобраны черновые поверхности и связи, соответствующие условиям. Они показаны на рис. 6.

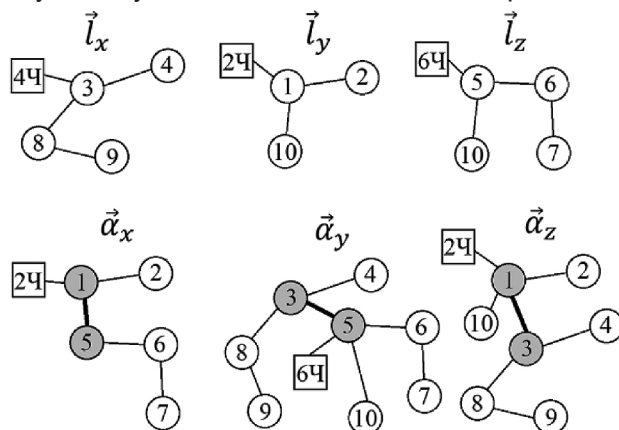


Рис. 6. Вариант подбора черновых поверхностей по разработанным условиям

Fig. 6. A selection option for rough surfaces according to the specified conditions

Модельные эксперименты с различными конфигурациями деталей и выявленными условиями показали, что последовательная обработка поверхностей деталей возможна для различных наборов базировочных точек, при наличии непосредственных связей между выбранными черновыми базировочными поверхностями и поверхностями, которые условно связаны во всех трех угловых направлениях (выделены серым на рис. 6). Данный вариант сочетания черновых и будущих поверхностей показан на рис. 7.

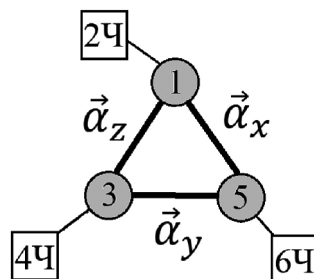


Рис. 7. Вариант сочетания черновых поверхностей и поверхностей детали, образующих граф связи угловых измерений

Fig. 7. An option for combining rough surfaces and part surfaces forming an angular measurement connection graph

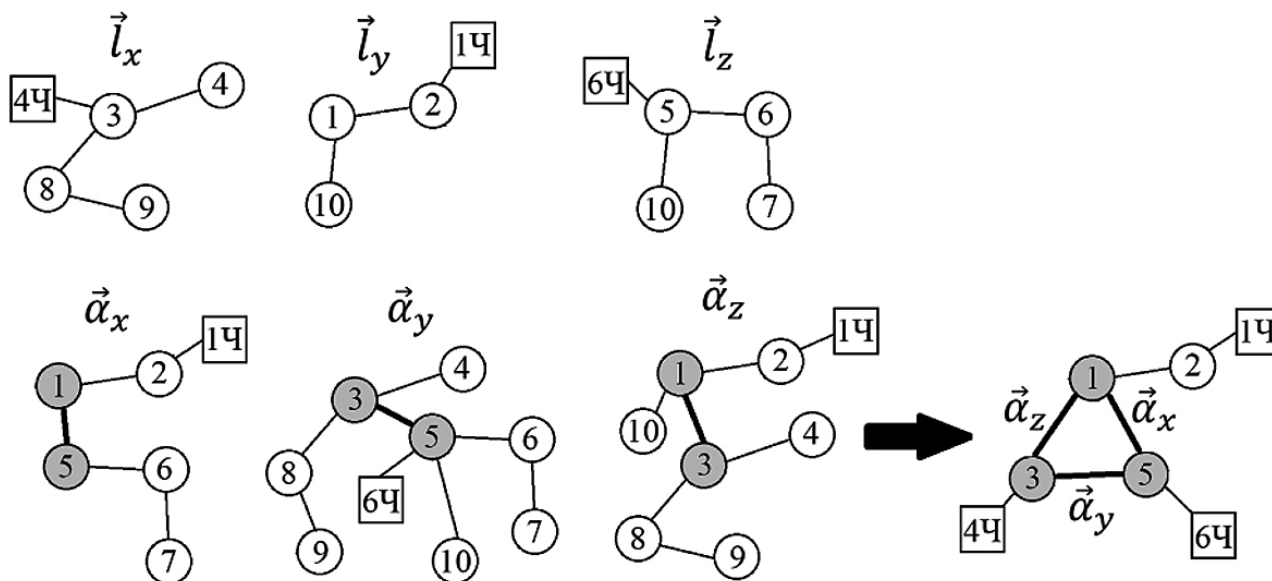


Рис. 8. Второй вариант сочетания черновых поверхностей с поверхностями детали по разработанным условиям

Fig. 8. The second combination option for rough surfaces and part surfaces according to the specified conditions

Исследования позволили выявить другие возможные варианты сочетаний, при которых обработка детали возможна. Одним из таких случаев является вариант, когда одна из базовых (черновых) поверхностей не имеет непосредственной связи с поверхностями детали. В таком случае обработка должна начинаться именно с этой поверхности (рис. 8).

Это значит, что поверхность 1Ч (см. рис. 8) должна выступать в качестве установочной базы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании рассмотренных условий и алгоритма последовательной обработки предложен формальный метод выбора чер-

новых баз. Для выбора черновых поверхностей необходимо, чтобы в процессе конструирования изделия было выполнено условие связи угловых измерений, т. е. группы поверхностей, имеющие размерные связи в направлениях ($\vec{l}_x, \vec{l}_y, \vec{l}_z$), имели межгрупповые связи в угловых направлениях. При выполнении данного условия конструктором (специалистом) необходимо черновые базирующие поверхности связать с поверхностями, образующими граф связей угловых измерений. Это позволит гарантированно получить последовательность обработки всех поверхностей данной геометрической конфигурации детали без перерасчета допусков и размерных связей.

Список источников

1. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении. Л.: Машиностроение, 2001. 368 с.
2. Базров Б.М. Модульная технология и ее внедрение в механосборочное производство // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2014. № 7. С. 24–30. EDN: SJARMX.
3. Пуш В.Э, Пигерт Р., Сосонкин В.Л. Автоматические станочные системы. 3-е изд., доп. и перераб. М.: Машиностроение, 1982. 319 с.
4. Митрофанов С.П. Научная организация труда машиностроительного производства. Л.: Машиностроение, 1976. 712 с.
5. Андриченко А.Н. Три поколения российских САПР технологических процессов // CAD/cam/cae Observer. 2017. № 2. С. 28–34. Режим доступа: <http://www.cadcamcae.lv/N110/28-34.pdf> (дата обращения: 30.09.2023).
6. Хараджиев А. Комплексная автоматизация подготовки производства на базе СПРУТ-технологии // САПР и графика. 2000. № 11. Режим доступа: <https://sapr.ru/article/8111> (дата обращения: 30.09.2023).
7. Skander A., Roucoules L., Meyer J.-S.K. Design and manufacturing interface modelling for manufacturing processes selection and knowledge synthesis in design // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008. Vol. 37. Iss. 5-6. P. 443–454. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1003-2>.
8. Yusof Yu., Latif K. Survey on computer-aided process planning // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 75. P. 77–89. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6073-3>.

9. Ayadi B., Anselmetti B., Bouaziz Z., Zghal A. Three-dimensional modelling of manufacturing tolerancing using the ascendant approach // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008. Vol.39. Iss. 3. P. 279–290. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1225-3>.
10. Соколовский А.П. Научные основы технологии машиностроения. Л.: Машгиз, 1955. 516 с.
11. Балакшин Б.С. Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении. М.: Машиностроение, 1972. 615 с.
12. Старостин В.Г., Лелюхин В.Е. Формализация проектирования процессов обработки резанием. М.: Машиностроение, 1986. 136 с.
13. Лелюхин В.Е., Колесникова О.В., Ружицкая Е.В. Антоненкова Т.В. Геометрия неидеальных объектов в инженерной деятельности (машиностроение и робототехника): монография. М.: Знание-М, 2020. 104 с. EDN: AHTHGZ.
14. Lelyukhin V.E., Kolesnikova O.V., Ruzhitskaya E.V. The geometry of non-ideal objects in process engineering for processing parts on machine tools // *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering* / eds. A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov. Cham: Springer, 2022. P. 165–173. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_20.
15. Балакшин Б.С. Теория и практика технологии машиностроения: в 2-х кн. Кн. 2: Основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1982. 367 с.
16. Яхин А.Б. Проектирование технологических процессов механической обработки. М.: Оборонгиз, 1946. 268 с.
17. Корсаков В.С. Основы технологии машиностроения. М.: Высшая школа, 1974. 416 с.
18. Базров Б.М. Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.
19. Kolesnikova O.V., Lelyukhin V.E., Ignatiev F.Yu. Formation of schemes generating geometric structure of machine parts // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. P. 355–363. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063_138.
20. Антоненкова Т.В. Способ формального проектирования структуры технологических процессов // *Технология машиностроения*. 2023. № 3(129). С. 1–12. <https://doi.org/10.23670/IRL.2023.129.51>. EDN: QPTVMU.
21. Игнатъев Ф.Ю., Колесникова О.В., Лелюхин В.Е. Исследование сходимости алгоритма автоматического проектирования технологического процесса механической обработки // *Ученые записки КнАГТУ. Науки о природе и технике*. 2021. Т. 53. С. 30–37. <https://doi.org/10.17084/20764359-2021-53-30>. EDN: SHRRMZ.

References

1. Bazrov B.M. *Modular technology in mechanical engineering*. Leningrad: Mashinostroenie; 2001, 368 с. (In Russ.).
2. Bazrov B.M. Modular processing and its application in mechanical assembly production. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2014;7:24-30. (In Russ.). EDN: SJARMX.
3. Push V.E., Pigert R., Sosonkin V.L. *Automated machining systems*. Moscow: Mashinostroenie; 1982, 319 p. (In Russ.).
4. Mitrofanov S.P. *Scientific organization of labor in mechanical engineering production*. Leningrad: Mashinostroenie; 1976, 712 p. (In Russ.).
5. Andrichenko A.N. Three generations of Russian CAD technological processes. In: *CAD/cam/cae Observer*. 2017;2:28-34. Available from: <http://www.cadcamcae.lv/N110/28-34.pdf> [Accessed 30th September 2023]. (In Russ.).
6. Kharadzhiev A. Integrated automation of manufacturing preparation based on SPRUT technology. *SAPR i grafika*. 2000;11. Available from: <https://sapr.ru/article/8111> [Accessed 30th September 2023]. (In Russ.).
7. Skander A., Roucoules L., Meyer J.-S.K. Design and manufacturing interface modelling for manufacturing processes selection and knowledge synthesis in design. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008;37(5-6):443-454. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1003-2>.
8. Yusof Yu., Latif K. Survey on computer-aided process planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;75:77-89. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6073-3>.
9. Ayadi B., Anselmetti B., Bouaziz Z., Zghal A. Three-dimensional modelling of manufacturing tolerancing using the ascendant approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008;39(3):279-290. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1225-3>.
10. Sokolovskij A.P. *Scientific foundations of the mechanical engineering technology*. Leningrad: Mashgiz; 1955, 516 p. (In Russ.).
11. Balakshin B.S. *Interchangeability and engineering measurements in mechanical engineering*. Moscow: Mashinostroenie; 1972, 615 p. (In Russ.).
12. Starostin V.G., Lelyukhin V.E. *Cutting design formalization*. Moscow: Mashinostroenie; 1986, 136 p. (In Russ.).
13. Lelyukhin V.E., Kolesnikova O.V., Ruzhickaya E.V. Antonenkova T.V. *Geometry of non-ideal objects in engineering (mechanical engineering and robotics)*. Moscow: Znanie-M; 2020, 104 p. (In Russ.). EDN: AHTHGZ.
14. Lelyukhin V.E., Kolesnikova O.V., Ruzhitskaya E.V. The geometry of non-ideal objects in process engineering for processing parts on machine tools. In: Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds.). *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer; 2022, p. 165-173. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_20.
15. Balakshin B.S. *Theory and practice of mechanical engineering technology*. Moscow: Mashinostroenie; 1982, 367 p. (In Russ.).
16. Yakhin A.B. *Designing technological processes of mechanical processing*. Moscow: Oborongiz; 1946, 268 p. (In Russ.).

17. Korsakov B.C. *Fundamentals of mechanical engineering technology*. Moscow: Vysshaya shkola; 1974, 416 p. (In Russ.).
18. Bazrov B.M. *Technological bases for self-adjusting machine design*. Moscow: Mashinostroenie; 1978, 216 p. (In Russ.).
19. Kolesnikova O.V., Lelyukhin V.E., Ignatiev F.Yu. Formation of schemes generating geometric structure of machine parts. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020;355-363. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063_138.
20. Antonenkova T.V. A way to formally design the structure of technological processes. In: *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal Tekhnologiya mashinostroeniya* = International scientific research journal *Engineering Technology*. 2023;3:1-12. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRL.2023.129.51>. EDN: QPTVMU.
21. Ignatiev F.Yu., Kolesnikova O.V., Lelyukhin V.E. Investigation of the convergence of the automatic design algorithm of the mechanical processing technological process. *Uchenye zapiski Komso-mol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nauki o prirode i tekhnike. Mashinostroenie* = *Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. Series: Engineering and Natural Sciences. Mechanical engineering*. 2021;53:30-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.17084/20764359-2021-53-30>. EDN: SHRRMZ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Игнатьев Федор Юрьевич,
доцент департамента Компьютерно-интегрированных
производственных систем
Политехнического института,
Дальневосточный федеральный университет,
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, Россия
✉ f.ignatyev@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0009-0006-0317-2133>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Fedor Yu. Ignatiev,
Associate Professor of the Department
of Computer-Integrated Production Systems of the
Polytechnic Institute,
Far Eastern Federal University,
10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok 690091, Russia
✉ f.ignatyev@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0009-0006-0317-2133>

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.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 07.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 20.02.2024 г.; принята к публикации 25.02.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 07.02.2024; approved after reviewing 20.02.2024; accepted for publication 25.02.2024.

Original article

EDN: QCPJUN

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-31-39

MECHANICAL ENGINEERING



Optimization design of shearer drum height adjusting mechanism based on particle swarm optimization algorithm

Degen Li^{1✉}, Wenbo Jia², Chunping Ren³¹⁻³Heilongjiang University of Science and Technology, Heilongjiang, Harbin, China

Abstract. The underground working environment of the shearer is complex and the working conditions are relatively poor. It is necessary to continuously adjust the height of the rocker arm during the operation, improve the operation efficiency, and improve the ability of the shearer to adapt to the more complex coal seam working environment. In order to optimize the structure of the shearer adjustment mechanism, the strength and strength of the adjustment mechanism are improved by increasing the size and angle of the adjustment mechanism and reducing the size and angle. Therefore, an optimized particle group design method is proposed to optimize the drum adjustment mechanism of the shearer. Seven parameters such as large lever, small lever and maximum swing angle are selected as design variables. Under the condition of limiting mining height and rocker length, an optimization model with rolling angle and cylinder stress as objective functions is established. The working characteristics of each part of the coal machine height adjustment mechanism are analyzed. The particle swarm optimization algorithm is used to optimize the key parameters, and the optimization results are verified to ensure their accuracy. The optimization results are compared with the original parameters. The results show that compared with the pre-optimization, the cylinder stroke is shortened by 17.9%, the cylinder length is shortened by 8.94%, the rolling angle is reduced by 2.83%, the cylinder tension is reduced by 12.1%, and the rocker bending moment is increased by 6.83 %, which meets the original design goal. Therefore, the research provides a reference for the optimal design of the coal machine height adjustment system.

Keywords: shearer, adjustment mechanism, rolling angle, rocker length, optimization, particle swarm, optimal design

Funding: This work was supported by The National Natural Science Foundation of China (Project no. 51974111).

For citation: Li Degen, Jia Wenbo, Ren Chunping. Optimization design of shearer drum height adjusting mechanism based on particle swarm optimization algorithm. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):31-39. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-31-39>. EDN: QCPJUN.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 622.23.05

Оптимизационная конструкция механизма регулировки высоты барабана машины для добычи угля на основе алгоритма роя частиц

Дэгэн Ли^{1✉}, Вэньбо Цзя², Чунпин Рэн³¹⁻³Хэйлунцзянский научно-технический университет, г. Харбин, КНР

Резюме. Цель – оптимизация конструкции механизма регулировки высоты барабана угледобывающей машины путем изменения размера и угла механизма регулировки для повышения надежности работы механизма в тяжелых эксплуатационных условиях. В работе использован метод оптимизации роя частиц. В качестве опорных параметров были выбраны значения длины большого рычага, длины малого рычага и максимального угла поворота коромысла. При условии ограничения рабочей высоты и длины коромысла установлена многоцелевая оптимизационная модель с углом качания и напряжением цилиндра барабана в качестве целевых функций и переведена в одноцелевую функцию (при помощи линейных весовых коэффициентов). Граничные условия оптимизации получены на основе анализа рабочих характеристик каждой части механизма регулировки рабочей высоты угледобывающей машины – угол качания, ход цилиндра, нагрузка на цилиндр и коромысло, ограничение по высоте и длине коромысла и рычагов. Алгоритм оптимизации роя частиц использован для оптимизации ключевых размерных и угловых параметров коромысла. Результаты оптимизации проверены для оценки их точности. Установлено, что по сравнению с исходными параметрами удалось достичь следующих изменений оптимизируемых величин: ход цилиндра сократился на 17,9%, длина цилиндра сократилась на 8,94%, угол качания уменьшился на 2,83%, напряжение цилиндра уменьшилось на 12,1%, на 6,83% увеличился изгибающий момент коромысла. Таким образом, предложены рекомендации по оптимизации конструкции системы регулировки высоты коромысла угледобывающей машины, способствующие повышению надежности ее работы в сложных условиях.

© Li Degen, Jia Wenbo, Ren Chunping, 2024

<https://ipolytech.elpub.ru>

Ключевые слова: угледобывающая машина, механизм регулировки, угол прокрутки, длина коромысла, оптимизация, рой частиц, оптимизационная конструкция

Финансирование. Работа была выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (проект No. 51974111).

Для цитирования: Ли Дэгэнь, Цзя Вэньбо, Жэнь Чуньпин. Оптимизационная конструкция механизма регулировки высоты барабана машины для добычи угля на основе алгоритма роя частиц // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 31–39. (In Eng.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-31-39>. EDN: QCPJUN.

INTRODUCTION

The working efficiency and stability of coal mining machine determines the mining rate of coal which is as one of the key parameters of coal mining [1]. During the working process of the coal miner, the swing of the rocker arm mainly relies on the height adjustment mechanism for control, therefore, the height adjustment mechanism is an important part of the coal miner and affects the working efficiency and reliability of the coal miner [2]. The key components of the height adjustment system are easily damaged due to excessive forces due to the complex working environment and changing loads. This is why it is so important to optimise the size of the key components of the raising mechanism.

Liu Chunsheng et al. [3] used the interior point penalty function method to optimise the height adjusting mechanism of the coal mining machine and obtained the optimal solution for the key components of the height adjusting mechanism of the coal mining machine. Zhao Lijuan et al. [4] used similar theory to optimise the design of the coal mining machine height adjustment mechanism and obtained the optimal solution for the key components of the coal mining machine height adjustment mechanism. Wang Yadong et al. [5] verified the accuracy of the control strategy for adaptive height adjustment of the coal mining machine by simulating the drum through idealised signals and combining the virtual prototype with algorithms. Li Fuqing et al. [6] used Matlab/Simulink to dynamically analyse the height-adjustment mechanism. Ji Cheng [7] established a mechanical model of the height adjustment system of the coal mining machine and concluded that the hydraulic cylinder damping was negatively correlated with the vibration of the cut-off section. Drawing on the aforementioned research results, the author applied the particle swarm algorithm to optimise the key components of the height adjusting mechanism and used a coal mining machine as a design example to verify the accuracy of the optimised design results.

MATHEMATICAL MODEL OF THE HEIGHT ADJUSTING MECHANISM

The control of the roller coal mining machine height adjustment mechanism mainly relies on the hydraulic cylinder, the hydraulic cylinder is an important part of the coal mining machine, owing to the harsh working environment of the coal mining machine, and the small space of the body, the structure is more compact, the size of the cylinder requirements are also more strict. Damage to the cylinder is mainly comes in the form of cylinder head breaking off or piston rod breakage; repairing the damage will not only reduce efficiency, but also increase costs, so the design of the height adjustment mechanism must ensure the minimum load on the hydraulic cylinder to effectively improve the reliability of the machine.

When determining the design load of the height adjustment cylinder, it is important to select the correct working conditions for the calculation. The working condition of the coal miner down-hole is to adjust the height while hauling, with the front drum rotating counter-clockwise and the drum adjusting downwards at its highest position to calculate the design load of the heightening cylinder. The structure and dimensions of the coal miner's height adjustment mechanism is shown in Fig. 1. When the drum is adjusted upwards, the push cylinder moves forward, pushing the bottom end of the lower trunnion plate forward, the top end of the lower trunnion plate upwards, the rocker arm moves upwards together with the lower trunnion plate, and the drum is raised together with the rocker arm; when the drum is adjusted downwards, the push cylinder contracts, driving the bottom end of the lower trunnion plate downwards, and the top end of the lower trunnion plate. When the drum is lowered, the push cylinder contracts and moves the bottom end of the lower trunnion plate down, the top of the lower trunnion plate is lowered and the rocker arm is lowered and the drum moves down.

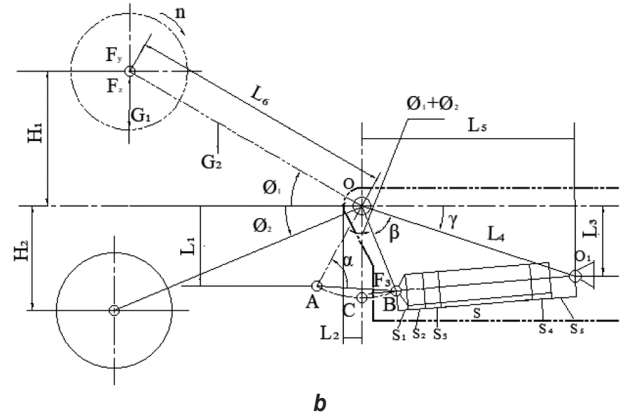
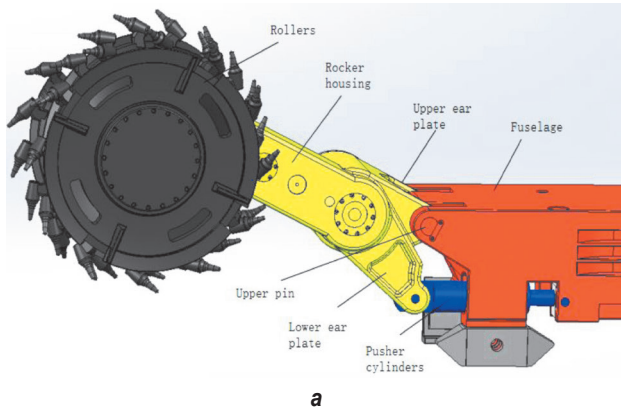


Fig. 1. Structure (a) and dimensions (b) of the height adjustment mechanism
Рис. 1. Конструкция (a) и размеры (b) механизма регулировки высоты

DETERMINATION OF THE OBJECTIVE FUNCTION, PENDULUM ANGLE

In the diagram, L_1 is the vertical distance between the full extension point A of the cylinder and the swing center O, L_2 is the length from the swing centre O of the rocker arm to the end of the body, L_3 is the vertical distance from the swing centre O to the rear stranding point O_1 of the cylinder, L_4 is the straight line distance from O to the point O_1 , L_5 is the horizontal distance from the swing centre O to the rear stranding point O_1 of the cylinder, L_6 is the length of the rocker arm, H_1 is the maximum upper swing height of the drum, H_2 is the maximum lower swing height of the drum, ϕ_1 is the maximum upper swing angle of the drum, ϕ_2 is the maximum lower swing angle of the drum, β and γ are the installation position angles, A and B are the positions of the piston rod and the stranding point of the small rocker arm when the cylinder is fully deep out and retracted [8–10].

The expansion and contraction of the push cylinder drives the movement of the rocker arm. In the process of coal mining, the height of the drum needs to be adjusted continuously, and the rocker arm swings continuously. In order to improve the efficiency, the angle of swing should be reduced to make the adjustment more rapid, i.e. the angle of swing of the cylinder up and down $\Delta\phi$ is minimum. In other words:

$$\Delta\phi = (K_{CO_1} - K_{AO_1})^2 + (K_{CO_1} - K_{BO_1})^2; \quad (1)$$

$$K_{AO_1} = \frac{L_4 \sin \gamma - R \sin(\beta + \gamma + \phi_1 + \phi_2)}{L_4 \cos \gamma - R \cos(\beta + \gamma + \phi_1 + \phi_2)};$$

$$K_{BO_1} = \frac{R \sin(\beta + \gamma) - L_4 \sin \gamma}{L_4 \cos \gamma - R \cos(\beta + \gamma)};$$

$$K_{CO_1} = \frac{R - L_4 \sin \gamma}{L_4 \cos \gamma}.$$

Rectifying equation (1) yields that the objective function is expressed as follows:

$$Y_1 = \left[\frac{R - L_4 \sin \gamma}{L_4 \cos \gamma} - \frac{L_4 \sin \gamma - R \sin(\beta + \gamma + \phi_1 + \phi_2)}{L_4 \cos \gamma - R \cos(\beta + \gamma + \phi_1 + \phi_2)} \right]^2 + \left[\frac{R - L_4 \sin \gamma}{L_4 \cos \gamma} - \frac{R \sin(\beta + \gamma) - L_4 \sin \gamma}{L_4 \cos \gamma - R \cos(\beta + \gamma)} \right]^2. \quad (2)$$

CYLINDER STROKE

The swinging arm needs to be driven by the expansion and contraction of the cylinder, the stroke of the cylinder should be reduced, i.e. the minimum cylinder stroke in order to improve efficiency,

$$S_{\max} = s + s_1 + s_2 + s_3 + s_4 + s_5 = s + s_z.$$

Eq: S_z - Axial dimensions required for the construction of the cylinder, which can be considered as a constant, mm.

The requirement that the cylinder stroke s be minimal is equivalent to $s_{\max} = \sqrt{R^2 + L_4^2 - 2RL_4 \cos \beta}$ is minimal, so that the objective function

$$s = \sqrt{R^2 + L_4^2 - 2RL_4 \cos \beta}. \quad (3)$$

OBJECTIVE FUNCTION OF THE FORCES ON THE CYLINDER

In order to protect the key components of the raising system, it is necessary to minimise the load on the system, i.e. to minimise the force on the cylinders.

$$F_3 = \frac{M_1}{R \sin \alpha};$$

$$M_1 \approx \left[F_y \sin \phi_1 + (F_z - G_1 - \frac{G_2}{2}) \cos \phi_1 \right] L_6;$$

$$\sin \gamma = \frac{L_4 \sin(\phi_1 + \phi_2 + \beta)}{\sqrt{R^2 + L_4^2 - 2RL_4 \cos(\phi_1 + \phi_2 + \beta)}};$$

$$Y_3 = \frac{\left[\frac{0.55T}{1.5} \sin \phi_1 + \left(\frac{1.91 \times 10^7 N_H \eta K}{nD_c} - G_1 - \frac{G_2}{2} \right) \cos \phi_1 \right] L_6}{\frac{RL_4 \sin(\phi_1 + \phi_2 + \beta)}{\sqrt{R^2 + L_4^2 - 2RL_4 \cos(\phi_1 + \phi_2 + \beta)}}}. \quad (4)$$

ROCKER ARM FORCES

The rocker arm is an important part of the coal mining machine, connecting the machine body to the drum. It is necessary to minimise the force on the rocker arm to protect the rocker arm during work.

$$F_4 = \left[F_y \sin \phi_1 + (F_z - G_1 - \frac{G_2}{2}) \cos \phi_1 \right] L_6. \quad (5)$$

In summary, there are four sub-objective functions, which belong to the multi-objective optimization problem. It is generally converted into a single objective function for optimization in order to make the optimization objective function simple. In this paper, the linear weighting coefficient method is used to convert the multi-objective function into a single objective function for optimization, from the formulae (2), (3), (4), (5) can be obtained from the optimal objective function, that is

$$F(x)_{\min} = w_1 \Delta \phi + w_2 s + w_3 F_3 + w_4 F_4. \quad (6)$$

Where w_1, w_2, w_3, w_4 and are weighted factors indicating the magnitude of the influence of each sub-goal on the overall goal. General requirements $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$. Consider the level of impact, Fetch $w_1 = 0.3, w_2 = 0.3, w_3 = 0.3, w_4 = 0.1$.

BINDING CONDITIONS, MINING HEIGHT CONSTRAINTS

There is a limit to the height at which the coal miner drum can swing up and down [11, 12], and the range of heights at which the drum can swing up and down, H_1 and H_2 , can be obtained, as shown in Fig. 2. There are $L_6 \sin \phi_1 \geq H_1, L_6 \sin \phi_2 \geq H_2$. The constraints are

$$g(1) = L_6 \sin \phi_1 - H_1 \geq 0; \quad (7)$$

$$g(2) = L_6 \sin \phi_2 - H_2 \geq 0. \quad (8)$$

COAL THROWING CONSTRAINTS

During the working process of the coal miner, the cut-off teeth on the drum cut off the coal and the falling coal blocks are thrown down to the scraper conveyor with the movement of the drum blades to the coal outlet, the rocker mechanism of the coal miner is shown in Fig. 2.

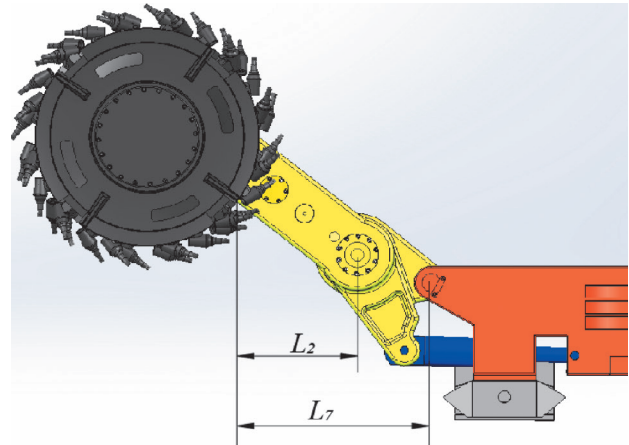


Fig. 2. Rocker arm mechanism model
Рис. 2. Модель коромысла

To keep the coal from falling on the body, as shown in Fig. 2, there is

$$L_7 \geq L_2;$$

$$L_7 = L_6 \cos \phi_1 - \frac{1}{2} D_y \cos \left[\phi_1 + \arcsin \left(\frac{b}{D_y} \right) \right].$$

In Eq, L_y is horizontal distance from E to point O , mm;

D_y is blade diameter, mm;

H is rocker width, mm.

Binding conditions are

$$g(3) = L_6 \cos \phi_1 - \frac{1}{2} D_y \cos \left[\phi_1 + \arcsin \left(\frac{b}{D_y} \right) \right] - L_2 \geq 0. \quad (9)$$

CONSTRAINTS ON THE LENGTH OF THE ROCKER ARM

The gearing system inside the rocker arm is shown in Fig. 3. In order to extend the length of the rocker arm, a number of idler pulleys are installed in the rocker arm, generally the number of idler pulleys is $n_0 = 2 \sim 5$. Z_0 is the number of teeth of the idler pulley. $Z_2 > Z_1$ (Transmission ratio requirements), m is the modulus, maximum length of rocker arm is $L_{\max} = [4Z_0 + (Z_1 + Z_2) / 2]m$. Thus with $L_{\max} \geq L$, i.e.

$$g(4) = L_{\max} - L_6 \geq 0. \quad (10)$$

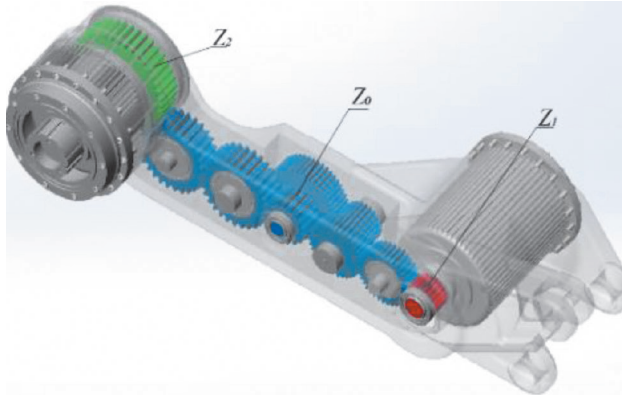


Fig. 3. Rocker arm transmission system
Рис. 3. Система передачи коромысла

CYLINDER STROKE

As seen in Fig. 1, the stroke size of the cylinder depends on the maximum swing angle, i.e.

$$s = s_{AO1} - s_{BO1} = \sqrt{R^2 + L_4^2 - 2RL_4 \cos(\phi_1 + \phi_2 + \beta)} - \sqrt{R^2 + L_4^2 - 2RL_4 \cos \beta};$$

or

$$s \approx 2R \sin \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}.$$

The size of the cylinder stroke should meet

$$s_{BO1} \geq s + s_1 + s_2 + s_3 + s_4 + s_5 = s + s_z$$

well organized

$$g(5) = 2\sqrt{R^2 + L_4^2 - 2RL_4 \cos \beta} - \sqrt{R^2 + L_4^2 - 2RL_4 \cos(\phi_1 + \phi_2 + \beta)} - s_z \geq 0. \quad (11)$$

NON-INTERFERENCE CONDITIONS AT POINTS A AND B

The perpendicular distance from A and B to point O cannot be too small, then there is

$$R \sin(\beta + \gamma) \geq L_{4\min};$$

$$R \sin(\beta + \gamma + \phi_1 + \phi_2) \geq L_{6\min},$$

i.e.

$$g(6) = R \sin(\beta + \gamma) - L_{4\min} \geq 0; \quad (12)$$

$$g(7) = R \sin(\beta + \gamma + \phi_1 + \phi_2) - L_{6\min} \geq 0. \quad (13)$$

CYLINDER REAR STRAND POINT CONDITIONS

The rear pivot point should be higher than the height of the transported coal seam, then there is

$$L_{5\max} \geq L_4 \cos \gamma, L_{3\max} \geq L_4 \sin \gamma \geq L_{3\min}, \text{ i.e.}$$

$$g(8) = L_{5\max} - L_4 \cos \gamma \geq 0; \quad (14)$$

$$g(9) = L_{3\max} - L_4 \sin \gamma \geq 0; \quad (15)$$

$$g(10) = L_4 \sin \gamma - L_{3\min} \geq 0. \quad (16)$$

SMALL ROCKER CONDITIONS

$$R_{\max} \geq R \geq R_{\min},$$

i.e.

$$g(11) = R_{\max} - R \geq 0; \quad (17)$$

$$g(12) = R - R_{\min} \geq 0. \quad (18)$$

THRUST OF THE CYLINDER

After determining the maximum working pressure of the cylinder p and the inner diameter of the cylinder D_1 and the diameter of the piston rod d , it is required that the hydraulic pressure generated by the cylinder should be greater than or equal to the load force [13–15], i.e.

$$\frac{\pi}{4}(D_1^2 - d^2)pk_1 \geq \frac{M_1}{R \sin \lambda}.$$

In the formula, k_1 is residual factor, $k_1=0.8$, then

$$g(13) = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - d^2)pk_1 - \frac{M_1}{R \sin \lambda} \geq 0. \quad (19)$$

PARTICLE SWARM ALGORITHMS

The particle swarm algorithm (PSO) is a swarm optimisation algorithm [16–18] for solving non-linear functions that iteratively searches for the optimal solution to an objective by simulating the flight foraging behaviour of a population of birds. without the selection, crossover and mutation operations required by genetic algorithms, the PSO algorithm is characterised by fast computational speed and easy parameter adjustment, and is widely used in the field of optimization⁴ [19, 20].

Suppose that the population of the particle algorithm consists of N particles moving in an D -dimensional search space. Then the position of the i particle, i.e. $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD})^T$, the velocity $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ of the i particle, the optimal position $P_{ibest} = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD})^T$ of the particle, and the population optimal position $P_{gbest} = (P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gD})^T$ of the population.

The iterative equations for position and velocity are expressed as follows; $X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + v_{id}^{k+1}$, $v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1r_1(P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2r_2(P_{id}^k - X_{id}^k)$ where v_{id}^k

⁴Кантович Л.И., Мерзляков В.Г. Горные машины и оборудование для подземных горных работ: учеб. пособие. М.: Изд-во МГГУ, 2014. 408 с.

is the velocity component of the particle in the d -dimensional direction after k iterations; X_{id}^k is the position component of particle i in the d -dimensional direction after k iterations; P_{ibest} is the position of the optimal fitness value reached by particle i after k searches; P_{gbest} is the optimal position reached by all particles after k searches, w is the inertia factor, k is the number of iterative searches, r_1, r_2 represent the random number of the interval at $[0,1]$. c_1 and c_2 are the acceleration factors, which represent the cognitive and social factors respectively. The flow chart of the particle swarm optimisation algorithm is shown in Fig. 4.

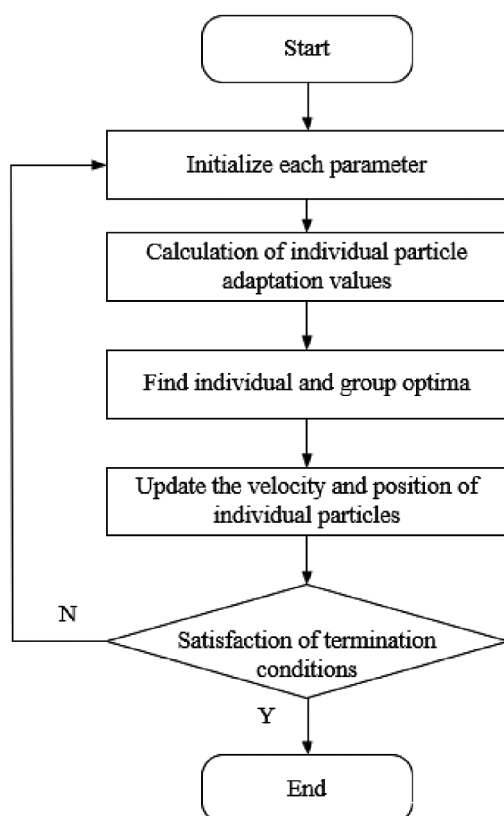


Fig. 4. Particle swarm optimization process
Рис. 4. Процесс оптимизации роя частиц

EXAMPLE OF AN OPTIMISED DESIGN

Parameter setting of the particle swarm algorithm Set the population parameters as follows: population dimension $D=7$, number of individuals in the population $n=1000$, maximum number of iterations $M=200$, learning factor $c_1=c_2=0.5$, inertia weights $w=0.44$.

CALCULATION EXAMPLES

MG300/700-WD coal mining machine as an example of calculation, raw data: $H_1=3187$, $H_2=267$, $D_y=1200$, $D=1400$, $h=500$, $L_{max}=2267$, $L_2=628$, $L_{1max}=320$, $\Delta=832.5$, $L_{5max}=1900$, $L_{3max}=460$, $L_{3min}=360$, $R_{min}=420$, $R_{max}=600$, $N_H=300$, $n=42$, $T=5.9 \times 1$, $G_1=25440$, $G_2=24890$, $P=23$, $D_1=180$, $d=140$, $w_1=0.3$, $w_2=0.3$, $w_3=0.3$, $w_4=0.1$, $Z_1=22$, $Z_2=40$, $n=7$. From equation (5), this objective function has seven variables that do not interfere with each other, i.e. $l_6, l_1, \phi_1, \phi_2, R, \beta, \gamma$, replacing these 7 variables with x .

Initial values of design variables, $X=[l_6, l_1, \phi_1, \phi_2, R, \beta, \gamma]^T = [2313, 1753, 57^\circ, 15^\circ, 476, 35^\circ, 16^\circ]^T$, the optimised results are shown in Table 1.

The changes in each objective function after optimisation are shown in Table 2.

As can be seen from Table 2, through optimisation, the cylinder stroke and length have been reduced by 17.9% and 8.94% respectively compared to before optimisation, improving the safety of the cylinder, the swing angle of the rocker arm has been reduced by 2.83% compared to before optimisation, which can make the coal miner more suitable for the narrow space downhole, the cylinder pressure has been reduced by 12.1% compared to before optimisation, improving the reliability of the cylinder, and the bending moment of the rocker arm has been increased by 6.83% compared to before optimisation, improving the strength of the

Table 1. Variable optimization results

Таблица 1. Результаты оптимизации переменных

Design volume	L6/mm	L4/mm	$\phi_1/^\circ$	$\phi_2/^\circ$	R/mm	$\beta/^\circ$	$\gamma/^\circ$
Original	2313	2754	37.8	16.0	504	38.0	14.0
Optimisation	2480	2684	36.5	15.8	550	40.6	12.7
$\Delta 1/\%$	7.22	-2.45	-3.44	-1.38	9.13	6.84	-9.29

Table 2. Objective function optimization results

Таблица 2. Результаты оптимизации целевой функции

Design volume	Cylinder stroke, s/mm	Cylinder length s_{B01}/mm	Swing angle $\phi_{max}/^\circ$	Cylinder pull F_3/N	Rocker momen F_4/N
Original	1017.5	1850.0	53.80	485324	7.352×10^8
Optimisation	835.4	1684.6	52.28	426589	7.854×10^8
$\Delta 2/\%$	-17.9	-8.94	-2.83	-12.10	6.83

rocker arm. The bending moment of the rocker arm has increased by 6.83% compared to that before optimisation, improving the strength of the rocker arm.

CONCLUSION

A particle swarm optimisation algorithm is applied to optimise the key dimensions of the key components of the height raising mechanism by constructing an optimisation model for the height raising system of the coal mining machine. The particle swarm optimization

algorithm was applied to the optimal design of the height-adjusting mechanism of the coal mining machine, and the optimization results were obtained with seven key parameters as the optimization objects. The result is that the cylinder stroke is shortened by 17.9%, the cylinder length is reduced by 8.94%, the swing angle is reduced by 2.83%, the cylinder tension is reduced by 12.1% and the rocker bending moment is increased by 6.83%, which has a better effect on the improvement of efficiency and the protection of the machine.

References

1. Wang G.F., Zhang D.S. Innovation practice and development prospect of intelligent fully mechanized technology for coal mining. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018;47(3):459-467.
2. Su X.P., Zhu L.K., Li W. Development of loading experiment table for shearer-drum-height mechanism. *Machine Design*. 2015;32(2):83-86.
3. Liu C.S., Ren C.Y. Optimised design of the coal miner drum height adjustment mechanism. *Colliery Mechanical & Electrical Technology*. 1990;1:12-17.
4. Zhao L.J., Fan S.M., Liu X.D. Optimization design of coal mining height-regulating mechanism based on similarity theory. *Machine Design*. 2017;34(5):94-98.
5. Wang Y.D., Zhao L.J., Zhang M.C. Research on self-adaptive height adjustment control strategy of shearer. *Journal of Coal Science and Engineering*. 2022;47(9):3505-3522.
6. Li Q.F. Dynamic analysis of height-regulating structure of shearer's cutting unit based on Matlab/Simulink. *Coal mining technology*. 2015;20(4):52-55.
7. Ji C. Research on dynamic characteristics of height adjustment system of drum shearer. *Coal Mine Machinery*. 2020;41(9):53-55.
8. Peng T.H., Zhang Y.L., Wang G.Y., et al. Simulation study on hydraulic-mechanical coupling adjusted by electro-hydraulic proportional of coal shearer. *Coal Science & Technology*. 2016;44(9):127-133.
9. Jaśkowiec K., Pirowski Z., Głowacki M., Bisztyga-Szklarz M., Bitka A., Małysza M., et al. Analyze the wear mechanism of the longwall shearer haulage system. *Materials (Basel)*. 2023;16(8):3090. <https://doi.org/10.3390/ma16083090>.
10. Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., Wasilewski S. The impact of cutting with a shearer on the conditions of longwall ventilation. *Energies*. 2021;14(21):6907. <https://doi.org/10.20944/preprints202106.0054.v1>.
11. Babokin G.I., Shpreher D.M., Zelenkov A.V. A software product for improving efficiency control of the electric drive of a shearer. *Russian Electrical Engineering*. 2022;93(1):26-33. <https://doi.org/10.3103/S1068371222010035>. EDN: CRWKCK.
12. Jaszczuk M., Pawlikowski A., Grzegorzec W., Szweda S. Prediction of the potential daily output of a shearer-loader. *Energies*. 2021;14(6):1647. <https://doi.org/10.3390/en14061647>.
13. Zhao Jiang-bin, Liang Meng-tao, Zhang Zao-yan, Cui Jian, Cao Xian-gang. Fault analysis of shearer-cutting units driven by integrated importance measure. *Applied Sciences*. 2023;13(4):2711. <https://doi.org/10.3390/app13042711>.
14. Kęsek M., Ogrodnik R. Method for determining the utilization rate of thin-deck shearers based on recorded electromotor loads. *Energies*. 2021;14(13):4059. <https://doi.org/10.3390/en14134059>.
15. Ratanavilisagul C. Dynamic population size and mutation round strategy assisted modified particle swarm optimization with mutation and reposition. *Procedia Computer Science*. 2016;86:449-452. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.078>.
16. Stefenon S.F., Neto C.S.F., Coelho T.S., Nied A., Yamaguchi C.K., Yow K.-C. Particle swarm optimization for design of insulators of distribution power system based on finite element method. *Electrical Engineering*. 2022;104(2):615-622. <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01332-3>.
17. Valencia-Rodríguez D.C., Coello C.A.C. Influence of the number of connections between particles in the performance of a multi-objective particle swarm optimizer. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2023;77(3):101231. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2023.101231>.
18. Ivanov A.Yu., Matrosova E.R. Technogenically provoked seepage activity in the northwestern part of the Black sea according to data from space. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2019;23(8):57-63. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-8-57-63>. EDN: QSAUVP.
19. Linnik Yu.N., Sherstkin V.V., Linnik V.Yu. Integral criterion of coal seam breakability. *Gornyi Zhurnal*. 2015;8:37-41. (In Russ.). EDN: UHKOSZ.
20. Kantovich L.I., Grigor'ev S.M., Grigor'ev A.S. Results of studying punching installations for trenchless construction of underground utilities. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2008;2:2-7. (In Russ.). EDN: HPLIIC.

Список источников

1. Wang G.F., Zhang D.S. Innovation practice and development prospect of intelligent fully mechanized technology for coal mining // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018. Vol. 47. No. 3. P. 459–467.
2. Su X.P., Zhu L.K., Li W. Development of loading experiment table for shearer-drum-height mechanism // *Machine Design*. 2015. Vol. 32. No. 2. P. 83–86.
3. Liu C.S., Ren C.Y. Optimised design of the coal miner drum height adjustment mechanism // *Colliery Mechanical & Electrical Technology*. 1990. No. 1. P. 12–17.
4. Zhao L.J., Fan S.M., Liu X.D. Optimization design of coal mining height-regulating mechanism based on similarity theory // *Machine Design*. 2017. Vol. 34. No. 5. P. 94–98.
5. Wang Y.D., Zhao L.J., Zhang M.C. Research on self-adaptive height adjustment control strategy of shearer // *Journal of Coal Science and Engineering*. 2022. Vol. 47. No. 9. P. 3505–3522.
6. Li Q.F. Dynamic analysis of height-regulating structure of shearer's cutting unit based on Matlab/Simulink // *Coal mining technology*. 2015. Vol. 20. No. 4. P. 52–55.
7. Ji C. Research on dynamic characteristics of height adjustment system of drum shearer // *Coal Mine Machinery*. 2020. Vol. 41. No. 9. P. 53–55.
8. Peng T.H., Zhang Y.L., Wang G.Y., et al. Simulation study on hydraulic-mechanical coupling adjusted by electro-hydraulic proportional of coal shearer // *Coal Science & Technology*. 2016. Vol. 44. No. 9. P. 127–133.
9. Jaśkowiec K., Pirowski Z., Głowacki M., Bisztyga-Szklarz M., Bitka A., Małysz M., et al. Analyze the wear mechanism of the longwall shearer haulage system // *Materials (Basel)*. 2023. Vol. 16. No. 8. P. 3090. <https://doi.org/10.3390/ma16083090>.
10. Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., Wasilewski S. The impact of cutting with a shearer on the conditions of longwall ventilation // *Energies*. 2021. Vol. 14. No. 21. P. 6907. <https://doi.org/10.20944/preprints202106.0054.v1>.
11. Babokin G.I., Shpreher D.M., Zelenkov A.V. A software product for improving efficiency control of the electric drive of a shearer // *Russian Electrical Engineering*. 2022. Vol. 93. No. 1. P. 26–33. <https://doi.org/10.3103/S1068371222010035>. EDN: CRWKCK.
12. Jaszcuk M., Pawlikowski A., Grzegorzek W., Szweda S. Prediction of the potential daily output of a shearer-loader // *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 6. P. 1647. <https://doi.org/10.3390/en14061647>.
13. Zhao Jiang-bin, Liang Meng-tao, Zhang Zao-yan, Cui Jian, Cao Xian-gang. Fault analysis of shearer-cutting units driven by integrated importance measure // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Iss. 4. P. 2711. <https://doi.org/10.3390/app13042711>.
14. Kęsek M., Ogrodnik R. Method for determining the utilization rate of thin-deck shearers based on recorded electromotor loads // *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 13. P. 4059. <https://doi.org/10.3390/en14134059>.
15. Ratanavilisagul C. Dynamic population size and mutation round strategy assisted modified particle swarm optimization with mutation and reposition // *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 86. P. 449–452. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.078>.
16. Stefenon S.F., Neto C.S.F., Coelho T.S., Nied A., Yamaguchi C.K., Yow K.-C. Particle swarm optimization for design of insulators of distribution power system based on finite element method // *Electrical Engineering*. 2022. Vol. 104. No. 2. P. 615–622. <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01332-3>.
17. Valencia-Rodríguez D.C., Coello C.A.C. Influence of the number of connections between particles in the performance of a multi-objective particle swarm optimizer // *Swarm and Evolutionary Computation*. 2023. Vol. 77. Iss. 3. P. 101231. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2023.101231>.
18. Иванов А.Ю., Матросова Е.Р. Техногенная грифонная активность в северо-западной части Черного моря по данным съемок из космоса // *Экология и промышленность России*. 2019. № 8. С. 57–63. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-8-57-63>. EDN: QSAUVP.
19. Линник Ю.Н., Шерсткин В.В., Линник В.Ю. Интегральный показатель оценки разрушаемости угольных пластов // *Горный журнал*. 2015. № 8. С. 37–41. EDN: УНКOSZ.
20. Кантович Л.И., Григорьев С.М., Григорьев А.С. Результаты исследования продавливающих установок для безотрадной технологии строительства подземных инженерных коммуникаций // *Горное оборудование и электро-механика*. 2008. № 2. С. 2–7. EDN: HPLIIC.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Degen Li,
Heilongjiang University of Science and Technology,
PuYuan Road, SongBei District,
Harbin, Heilongjiang 150022, China
✉ lidegen1982@126.com

Wenbo Jia,
Heilongjiang University of Science and Technology,
PuYuan Road, SongBei District,
Harbin, Heilongjiang 150022, China
1120077954@qq.com

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ли Дэгэн,
Хэйлунцзянский университет науки и технологий,
150022, ул. Пуюань, р-н Сунбэй,
г. Харбин, г. Хэйлунцзян, Китай
✉ lidegen1982@126.com

Цзя Вэньбо,
Хэйлунцзянский университет науки и технологий,
150022, ул. Пуюань, р-н Сунбэй,
г. Харбин, г. Хэйлунцзян, Китай
1120077954@qq.com

Chunping Ren,
Heilongjiang University of Science and Technology,
PuYuan Road, SongBei District,
Harbin, Heilongjiang 150022, China
renchunpin@sina.com

Жэнь Чуньпин,
Хэйлунцзянский университет науки и технологий,
150022, ул. Пуюань, р-н Сунбэй,
г. Харбин, г. Хэйлунцзян, Китай
renchunpin@sina.com

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.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the article

The article was submitted 09.11.2023; approved after reviewing 23.12.2023; accepted for publication 28.12.2023.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 09.11.2023 г.; одобрена после рецензирования 23.12.2023 г.; принята к публикации 28.12.2023 г.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 539.389:621.9.011

EDN: EAULHD

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-40-50



Исследование распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после механической обработки методами сверления зондирующих отверстий и цифровой корреляции изображений

М.С. Махалов^{1✉}, А.А. Кречетов², В.Ю. Блюменштейн³, В.В. Горбатенко⁴

¹⁻³Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачёва, г. Кемерово, Россия

⁴Институт физики прочности металлов СО РАН, г. Томск, Россия

Резюме. Цель – исследование распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после обработки экспериментальных образцов методами свободного ортогонального резания и поверхностного пластического деформирования. Обработка резанием и поверхностным пластическим деформированием образцов, изготовленных из стали 45, проводилась на фрезерном станке с числовым программным управлением в условиях варьирования технологических факторов обработки. Для проведения сравнительного анализа выполнялось также моделирование процессов методом конечных элементов с использованием идентичных экспериментальных значений геометрических параметров и режимов обработки. Для получения распределений остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя проводилось сверление зондирующих отверстий глубиной 0,5; 0,75; 1; 1,5; и 2 мм соответственно. Путем дифференцирования измеренных с использованием метода цифровой корреляции изображений перемещений материальных частиц поверхности образца были определены радиальные деформации вокруг зондирующих отверстий. Далее по этим значениям определялись компоненты остаточных напряжений для каждого зондирующего отверстия, с использованием представленного в работе расчетного алгоритма осуществлялся расчет усредненных значений каждого компонента остаточных напряжений. Так, после поверхностного пластического деформирования образца с усилием 3400 Н экспериментальное значение компонента σ_x в диапазоне глубин 0,5...0,75 мм от поверхности составило -250 МПа. Получены модельные и экспериментальные распределения компонент тензора остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после обработки двумя способами. Установлено, что экспериментальные значения остаточных напряжений в целом имеют хорошую сходимость между собой и с модельными распределениями на глубинах до 1 мм от обработанной поверхности при использованном диаметре сверла 1,7 мм. Предложенный авторами подход позволяет получить распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя путем сверления зондирующих отверстий различной глубины и оценки радиальных деформаций на поверхности образца с использованием метода цифровой корреляции изображений.

Ключевые слова: остаточные напряжения, механическое состояние металла, поверхностный слой, сверление зондирующих отверстий, метод цифровой корреляции изображений

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований, грант № 20-08-00587.

Для цитирования: Махалов М.С., Кречетов А.А., Блюменштейн В.Ю., Горбатенко В.В. Исследование распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после механической обработки методами сверления зондирующих отверстий и цифровой корреляции изображений // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 40–50. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-40-50>. EDN: EAULHD.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Study of the distribution of residual stresses across the surface layer depth following machining through probing hole drilling and digital image correlation

Maksim S. Makhalov^{1✉}, Andrey A. Krechetov², Valeriy Yu. Blumenstein³, Vadim V. Gorbatenko⁴

© Махалов М.С., Кречетов А.А., Блюменштейн В.Ю., Горбатенко В.В., 2024

¹⁻³T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

⁴Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. The article aims to study the distribution of residual stresses across the surface layer depth following the machining of test specimens (free orthogonal cutting and burnishing). The machining by cutting and burnishing of 45 steel specimens was carried out using a milling machine with numerical control under varying machining factors. For a comparative analysis, the processes were also modeled via the finite element method using identical experimental values of geometric parameters and machining modes. In order to obtain residual stress distributions across the surface layer depth, probe holes having depths of 0.5; 0.75; 1; 1.5; and 2 mm were drilled. By differentiating the displacement of specimen surface particles, measured using digital image correlation, radial strains around the probe holes were determined. Then, these values were used to determine the residual stress components for each probe hole, and the averaged values of each residual stress component were calculated using the calculation algorithm presented in this article. After burnishing the specimen with a force of 3400 N, the test value of the σ_x component within the depth range (from the surface) of 0.5–0.75 mm amounted to -250 MPa. Model and experimental distributions of residual stress tensor components across the surface layer depth were obtained following machining via two methods. The experimental values of residual stresses were found to have good convergence with each other and with model distributions at depths up to 1 mm from the machined surface at a drill diameter of 1.7 mm. The proposed approach provides a means to obtain the residual stress distribution across the surface layer depth by drilling probe holes of different depths and estimating radial strains on the specimen surface using the digital image correlation method.

Keywords: residual stresses, mechanical state of metal, surface layer, drilling probing holes, digital image correlation method

Funding: The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant no. 20-08-00587.

For citation: Makhalov M.S., Krechetov A.A., Blumenstein V.Yu., Gorbatenko V.V. Study of the distribution of residual stresses across the surface layer depth following machining through probing hole drilling and digital image correlation. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):40-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-40-50>. EDN: EAULHD.

ВВЕДЕНИЕ

Остаточные напряжения (ОН) являются важным фактором, оказывающим большое влияние на эксплуатационные свойства деталей машин. В настоящее время современные инженерные CAE-системы моделирования процессов изготовления и эксплуатации изделия позволяют оценивать значения остаточных напряжений с достаточно высокой достоверностью [1–11]. Однако наличие большого количества влияющих на их формирование факторов, необходимость исследования релаксации при эксплуатации изделия и многие другие вопросы сохраняют актуальным экспериментальное определение остаточных напряжений.

Механические методы определения остаточных напряжений используются для определения ОН как на поверхности, так и по глубине поверхностного слоя. Они получили наибольшее распространение потому, что с одной стороны появились раньше других, а с другой – построены на физических представлениях механики твердого тела, как и расчеты напряжений и деформаций, возникающих от внешних воздействий [12–17]. На практике подавляющее большинство таких методов основано на удалении материала, вследствие чего имеют неприемлемо высокую погрешность, которая вместе с трудоемкостью и необходи-

мостью разрушения объекта контроля составляет их главный недостаток.

Многочисленные неразрушающие методы не оказывают значимых результатов воздействия на исследуемый объект [18–20]. Однако для определения остаточных напряжений 1-го рода имеется ряд трудностей.

Так, рентгеновский метод с помощью дорогостоящего и громоздкого оборудования позволяет достоверно оценивать лишь ОН 2-го и 3-го рода в поверхностном слое преимущественно небольшой толщины (примерно до 50 мкм).

Характеристики, измеряемые акустическими и магнитными методами, имеют разную с ОН физическую природу и оценивают комплексное состояние металла: изменение измеряемой величины является результатом действия целого ряда факторов – изменений микроструктуры металла, степени поврежденности, а также величины и направления остаточных напряжений 1-го, 2-го и даже 3-го рода. Существенную проблему в этом направлении, в полной мере нерешаемую процедурами тарировки на эталонных образцах, представляет установление количественных взаимосвязей между величиной ОН и измеряемыми параметрами.

Оптические методы служат для измерения возникающих перемещений (деформаций) и для определения ОН применимы лишь со-

вместно с каким-либо разрушающим методом [21–23].

В работе [24] приведены результаты оценки напряженного состояния как непосредственно в процессе обкатывания, так и после механической обработки с использованием метода рентгеноструктурного анализа. Такой подход позволяет получить распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя в плоскости боковой грани образца, оценить влияние режимов обработки на формирование остаточных напряжений. Однако для измерения остаточных напряжений этим способом требуется громоздкое, дорогостоящее и энергоемкое оборудование. Время измерения в одной точке составляет 1 с, при необходимости определения в большом количестве точек общее время измерения может быть значительным.

Учитывая сказанное, перспективным для определения ОН, в том числе и по глубине поверхностного слоя представляется использованный в настоящей работе метод сверления зондирующего отверстия, дополненный методом цифровой корреляции изображений, который в свою очередь является развитием метода голографической интерферометрии [25–37].

При сверлении зондирующих отверстий на поверхности образца, имеющего ОН, происходят малые по величине перемещения материальных частиц, вызванные перераспределением внутренних напряжений, вышедших вследствие сверления из равновесного состояния. Для определения этих перемещений применяется метод цифровой корреляции изображений (Digital Image Correlation – DIC), использующий для оценки величины и направления смещения изображения спекл-структуры, созданной на поверхности образца когерентным лазерным освещением до и после процесса сверления. Уникальность спекл-структуры каждого фрагмента поверхности объекта определяется микрорельефом поверхности и изменяется при перемещениях материальных частиц поверхности.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после обработки экспериментальных образцов методами резания и поверхностным пластическим деформированием (ППД).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обработка экспериментальных образцов, изготовленных из стали 45 в состоянии поставки, резанием и ППД проводилась на фрезерном станке с ЧПУ [38]. Для проведения сравнительного анализа выполнялось также моделирование процессов методом конечных элементов, при этом использовались идентичные экспериментальным значения геометрических параметров и режима обработки (рис. 1).

В качестве базового режима резания (образцы серии 0101) были приняты:

- глубина резания $t = 0,35$ мм (использованный диапазон 0,2...0,5 мм);
- скорость резания $V = 20$ мм/мин (использованный диапазон 5...20 мм/мин).

Параметры режима ППД (образцы серии 0102) составили:

- профильный радиус индентора/валка $R_{пр} = 5$ мм (использованный диапазон 2...10 мм);
- усилие обработки $P = 3400$ Н (использованный диапазон 1500...3400 Н);
- скорость обработки $V = 20$ мм/мин (использованный диапазон 2...20 мм/мин).

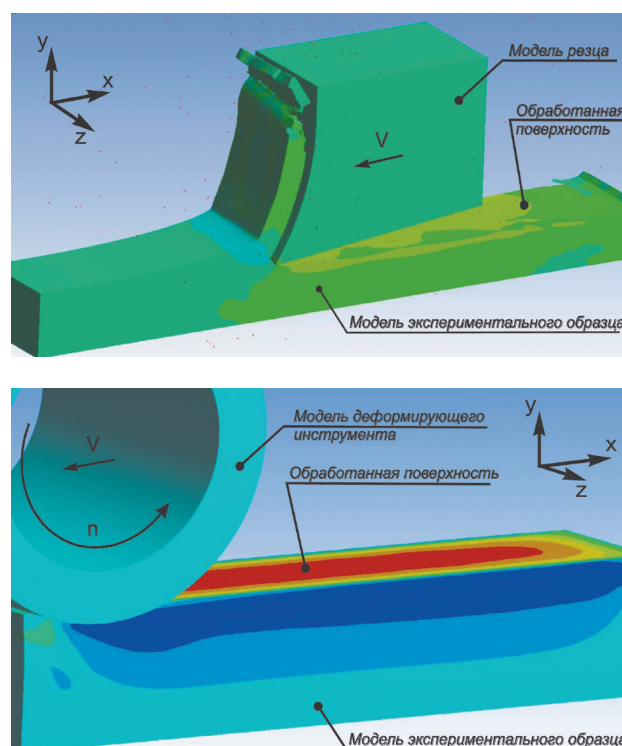


Рис. 1. Конечно-элементные модели нагружения экспериментальных образцов свободным ортогональным резанием и поверхностным пластическим деформированием

Fig. 1. Finite element models of free orthogonal cutting and surface plastic deformation loading of experimental samples

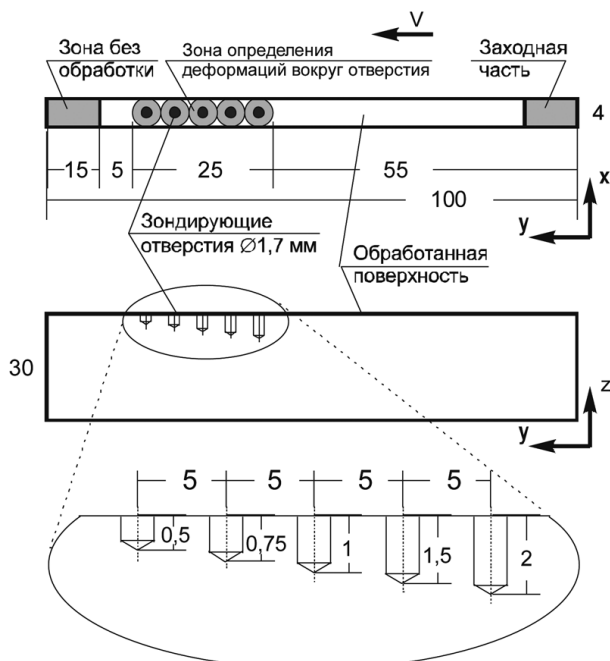


Рис. 2. Схема расположения зондирующих отверстий на экспериментальном образце
 Fig. 2. Experimental sample probing hole layout

Для измерения распределения ОН по глубине поверхностного слоя, на основе приведенных в [39] рекомендаций, на каждом образце на равных расстояниях друг от друга выполнялось 5 отверстий различной глубины (рис. 2). Частота вращения сверла составила 10000 об/мин, подача – 1 мм/мин.

Для каждого отверстия с использованием метода цифровой корреляции изображений по изображениям до и после сверления проводилась оценка векторов перемещений материальных частиц, дифференцированием

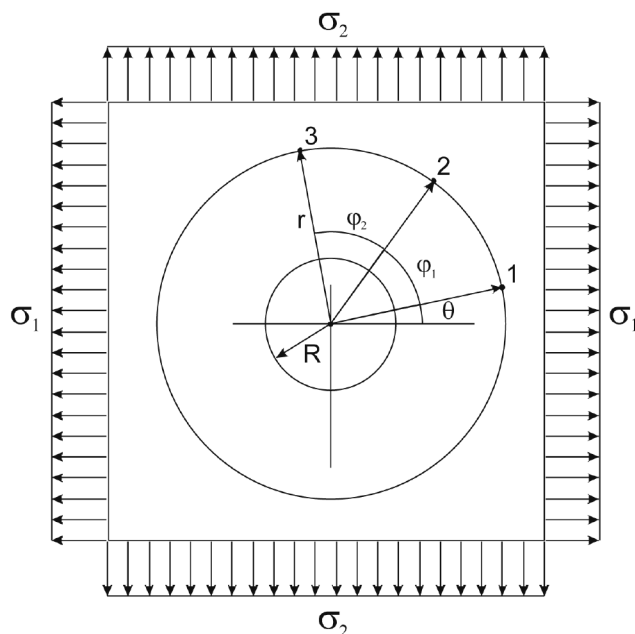


Рис. 3. К расчету ОН в тонких пластинах после сверления сквозных отверстий [12]
 Fig. 3. To residual stress calculation in thin plates after through holes drilling [12]

которых получали значения радиальных деформаций в точках вокруг отверстия.

Значения радиальной деформации в любых трех точках вокруг отверстия позволили рассчитать компоненты главных напряжений σ_1 , σ_2 и угол их поворота θ в выбранной системе координат.

В случае, когда все три точки лежат на одинаковом расстоянии r от центра отверстия (рис. 3), использовались следующие выражения [12, 39]:

$$\operatorname{tg} 2\theta = -\frac{\varepsilon_{r3} - \varepsilon_{r2} - (\varepsilon_{r3} - \varepsilon_{r1}) \cos 2\varphi_1 + (\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1}) \cos 2(\varphi_1 + \varphi_2)}{(\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1}) \sin 2(\varphi_1 + \varphi_2) - (\varepsilon_{r3} - \varepsilon_{r1}) \sin 2\varphi_1}; \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{A} \cdot \frac{\varepsilon_{r1} \cos 2(\theta + \varphi_1) - \varepsilon_{r2} \cos 2\theta}{\cos 2\theta - \cos 2(\theta + \varphi_1)} - \frac{E}{B} \cdot \frac{\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1}}{\cos 2\theta - \cos 2(\theta + \varphi_1)}; \quad (2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{A} \cdot \frac{\varepsilon_{r1} \cos 2(\theta + \varphi_1) - \varepsilon_{r2} \cos 2\theta}{\cos 2\theta - \cos 2(\theta + \varphi_1)} - \frac{E}{B} \cdot \frac{\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1}}{\cos 2\theta - \cos 2(\theta + \varphi_1)}; \quad (3)$$

$$A = \frac{R^2}{r^2} (1 + \mu); \quad B = \frac{R^2}{r^2} \left[4 - \frac{3R^2(1 + \mu)}{r^2} \right], \quad (4, 5)$$

где φ_1 – угол между 1-й и 2-й точками, град.; φ_2 , – угол между 2-й и 3-й точками, град.; E – модуль Юнга, МПа; ε_{r1} , ε_{r2} , ε_{r3} – радиальная деформация в 1-й, 2-й и 3-й точках соответственно; μ – коэффициент Пуассона; R – радиус отверстия, мм; A , B – комплексные коэффициенты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Получаемые по выражениям (1)–(5) результаты справедливы для случая определения ОН при сверлении сквозных отверстий в тонкой пластине. Однако для решения поставленной задачи получения распределений напряжений по глубине необходима адаптация представленных расчетных взаимосвязей для несквозных отверстий различной глубины в сплошной заготовке.

Анализ литературных источников [33–34, 39] показывает, что смещения (деформации), полученные при сверлении несквозного отверстия, как и в случае сверления отверстия в тонкой пластине, позволяют получить среднее значение ОН по толщине слоя, равного глубине этого отверстия.

Тогда, поскольку для зондирующих отверстий различной глубины главные напряжения s_1 , s_2 имеют разный угол поворота q относительно выбранной системы координат, для вычисления распределения по глубине для каждого отверстия необходимо определить нормальные s_x , s_y и касательные s_{xy} компоненты ОН. Предположим, что направление главного напряжения s_1 образует с осью x угол q , который меньше 90° , тогда:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \theta; \\ \sigma_y &= \sigma_2 \cos^2 \theta + \sigma_1 \sin^2 \theta; \\ \sigma_{xy} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\theta.\end{aligned}\quad (6)$$

Обозначим полученные для отверстий различной глубины компоненты соответствующими индексами (таблица) и рассмотрим последующий расчет на примере компонента σ_x .

Если для каждого отверстия известно осредненное по глубине этого отверстия значение какого-либо компонента, то произведение величины компонента на глубину отверстия (например, $\sigma_{x1} h_1$) эквивалентно площади соответствующего прямоугольника на рис. 4.

Расчет на примере компонента σ_x
Calculation by example of σ_x component

Номер отверстия (интервала)	Зондирующее отверстие		Обозначение компонента			Интервал глубины		Средне-интервальное значение компонента
	Обозначение	Глубина, мм	σ_x	σ_y	σ_{xy}	от	до	
1	h_1	0,5	σ_{x1}	σ_{y1}	σ_{xy1}	0	h_1	σ_{x1}^*
2	h_2	0,75	σ_{x2}	σ_{y2}	σ_{xy2}	h_1	h_2	σ_{x2}^*
3	h_3	1,0	σ_{x3}	σ_{y3}	σ_{xy3}	h_2	h_3	σ_{x3}^*
4	h_4	1,5	σ_{x4}	σ_{y4}	σ_{xy4}	h_3	h_4	σ_{x4}^*
5	h_5	2,0	σ_{x5}	σ_{y5}	σ_{xy5}	h_4	h_5	σ_{x5}^*

Очевидно, что, например, произведение $\sigma_{x2} h_2$ включает в себя произведение $\sigma_{x1} h_1$, а произведение $\sigma_{x3} h_3$ содержит $\sigma_{x2} h_2$ и т.д., поскольку каждое отверстие большей глубины охватывает собой слои металла, расположенные на меньших глубинах.

Учитывая это и используя соответствующие обозначения, имеется возможность рассчитать средне-интервальные значения компонент в интервалах глубин, представленных в таблице.

Очевидно, что $\sigma_{x1}^* = \sigma_{x1}$, далее определим σ_{x2}^* :

$$\sigma_{x2} h_2 = \sigma_{x1} h_1 + \sigma_{x2}^* (h_2 - h_1);$$

откуда

$$\sigma_{x2}^* = \frac{\sigma_{x2} h_2 - \sigma_{x1} h_1}{(h_2 - h_1)}.$$

Аналогично этому:

$$\begin{aligned}\sigma_{x3}^* &= \frac{\sigma_{x3} h_3 - \sigma_{x2} h_2}{(h_3 - h_2)}; \quad \sigma_{x4}^* = \frac{\sigma_{x4} h_4 - \sigma_{x3} h_3}{(h_4 - h_3)}; \\ \sigma_{x5}^* &= \frac{\sigma_{x5} h_5 - \sigma_{x4} h_4}{(h_5 - h_4)}.\end{aligned}\quad (7)$$

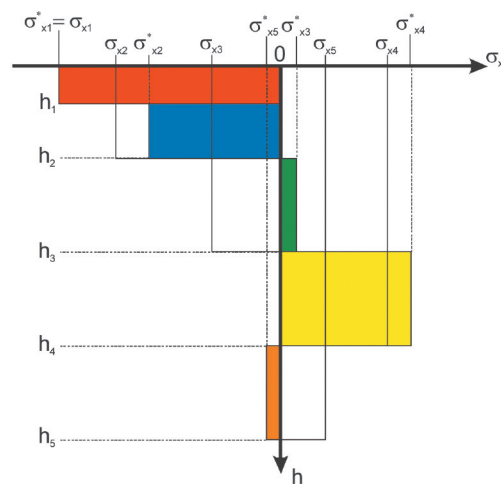


Рис. 4. Схема к определению и пример результирующего распределения компонента σ_x остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя

Fig. 4. Diagram of σ_x component surface layer depth determination and resulted averaged distribution example

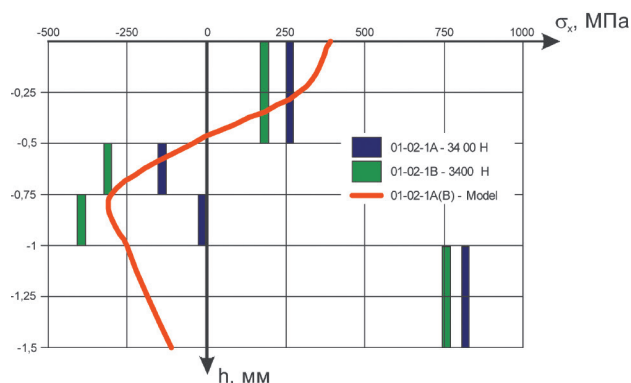


Рис. 5. Модельное и экспериментальные распределения осевого компонента ОН по глубине поверхностного слоя после обработки пластическим деформированием ($P = 3400 \text{ Н}$, $V = 20 \text{ мм/мин}$)

Fig. 5. Model and experimental distribution of the axial residual stress component by the surface layer depth after surface plastic deformation treatment ($P = 3400 \text{ N}$, $V = 20 \text{ mm/min}$)

С использованием представленных преобразований осуществляется расчет усредненных в пределах указанных диапазонов значений каждого компонента ОН (см. рис. 4).

В качестве примера на рис. 5 показано экспериментальное распределение осевого (вдоль наибольшего размера образца) компонента ОН по глубине поверхностного слоя. Экспериментальные точки получены на двух различных образцах (0102-1А и 0102-1В), обработанных ППД с идентичным режимом.

В использованной постановке процесса ППД осевой компонент имеет экстремум растягивающих ОН (370 МПа) на поверхности, распространяемых на глубину около 0,5 мм. Второй (отрицательный) экстремум для обеих моделей одинаков и располагается на глубине 0,8 мм от поверхности, величина ОН в нем составляет -300 МПа.

Экспериментальные значения ОН для представленных образцов имеют высокую сходимость между собой на всей рассматри-

ваемой глубине и хорошую сходимость с модельным распределением в диапазоне глубин 0...0,8 мм.

Полученные распределения качественно согласуются с результатами более ранних работ, в которых авторы подчеркивают возможность экстремума сжимающих ОН как на поверхности заготовки, так и на некоторой глубине [40, 41].

Анализ показал, что использованная постановка моделирования позволяет получить качественное и количественное соответствие экспериментальным данным, полученным для аналогичных условий обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представлена методика экспериментального определения остаточных напряжений путем сверления зондирующих отверстий совместно с методом цифровой корреляции изображений, позволяющая оценить распределение тангенциальной и нормальных составляющих в плоскости поверхности образца по глубине поверхностного слоя.

2. Показано, что определение остаточных напряжений на определенной глубине поверхностного слоя возможно путем сверления зондирующего отверстия соответствующей глубины и оценке радиальной деформации на поверхности образца, которая возникает вследствие перераспределения остаточных напряжений.

3. Получены модельные и экспериментальные распределения компонент тензора остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после обработки свободным ортогональным резанием и поверхностным пластическим деформированием. Экспериментальные значения ОН в целом имеют хорошую сходимость между собой и с модельными распределениями на глубинах до 1 мм от обработанной поверхности.

Список источников

1. Kostylev V.I., Margolin B.Z. Determination of residual stress and strain fields caused by cladding and tempering of reactor pressure vessels // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2000. Vol. 77. P. 723–735. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(00\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(00)00062-4).
2. Чирков А.В., Сазанов В.П., Самойлов В.А., Ларионова Ю.С. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 3. С. 171–174. EDN: TVWGJH.
3. Покровский А.М. Расчет остаточных напряжений в биметаллических опорных прокатных валках после термической обработки // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2012. С. 186–196. EDN: QNUUYV.
4. Hassani-Gangarajab S.M., Carbonib M., Guaglianob M. Finite element approach toward an advanced understanding of

- deep rolling induced residual stresses, and an application to railway axles // *Materials & Design*. 2015. Vol. 83. P. 689–703. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.026>.
5. Lyubenova N., Baehre D. Finite element modelling and investigation of the process parameters in deep rolling of AISI 4140 steel // *Journal of Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 5. Iss. 7-8. P. 277–287. <http://doi.org/10.17265/2161-6221/2015.7-8.004>.
6. Kukiela L., Szczesniak M., et al. Analysis of the states of deformation and stress in the surface layer of the product after the burnishing cold rolling operation // *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 862. P. 278–287. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.862.278>.
7. Радченко В.П., Саушкин М.Н., Бочкова Т.И. Математическое моделирование и экспериментальное исследование формирования и релаксации остаточных напряжений в плоских образцах из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения в условиях высокотемпературной ползучести // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Серия: Машиностроение, материаловедение*. 2016. № 1. P. 93–112. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.1.07>. EDN: VQTAHL.
8. Saini S., Ahuja I.S., Sharma V.S. Modeling the effects of cutting parameters on residual stresses in hard turning of AISI H11 tool steel // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 65. P. 667–678. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4206-0>.
9. Huang Xiaoming, Sun Jie, Li Jianfeng. Finite element simulation and experimental investigation on the residual stress-related monolithic component deformation // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 77. Iss. 5-8. P. 1035–1041. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6533-9>.
10. Su Jiann-Cherng, Young A. Keith, Ma Kong, Srivatsa Shesh, Morehouse B. John, Liang Y. Steven. Modeling of residual stresses in milling // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 65. P. 717–733. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4211-3>.
11. Ji Xia, Zhang Xueping, Liang Y. Steven Predictive modeling of residual stress in minimum quantity lubrication machining // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 70. P. 2159–2168. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5439-2>.
12. Биргер И.А. Остаточные напряжения. Серия: Физико-математическое наследие: физика (механика). 2-е изд. М.: Ленанд, 2015. 234 с.
13. Давиденков Н.Н. Измерение остаточных напряжений в трубах // *Журнал технической физики*. 1931. Т. 1. № 1. С. 206–218.
14. Разумовский И.А. Экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния: история, проблемы, перспективы развития // *Машиностроение и инженерное образование*. 2018. № 2. С. 17–32. EDN: XZIJKH.
15. Елеонский С.И., Одинцев И.Н., Писарев В.С., Усов С.М. Определение остаточных напряжений и коэффициентов интенсивности напряжений на основе локального удаления материала // *Ученые Записки ЦАГИ*. 2017. Т. 48. № 4. С. 57–77. EDN: ZDMMQL.
16. Aniskovich E.V., Moskvichev V.V., Makhutov N.A., Razumovskii I.A., Apalkov A.A., Plugatar T.P. Evaluation of residual stresses in the impeller blades of hydraulic units // *Power Technology and Engineering*. 2019. Vol. 53. № 1. P. 33–38. <https://doi.org/10.1007/s10749-019-01030-y>. EDN: SAKRHC.
17. Yonezu A., Kusano R., Hiyoshi T., Chen Xi. A method to estimate residual stress in austenitic stainless steel using a microindentation test // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015. Vol. 24. Iss. 1. P. 362–372. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1280-5>.
18. Венгринович В.Л., Винтов Д.А., Прудников А.Н., Подугольников П.А., Рябцев В.Н. Особенности измерения напряжений в ферромагнетиках методом эффекта Баркгаузена // *Контроль. Диагностика*. 2017. № 8. С. 10–17. <https://doi.org/10.14489/td.2017.08.pp.010-017>. EDN: ZCRNIJ.
19. Паньковский Ю.П. Аппаратная реализация некоторых магнитных методов неразрушающего контроля // *Мир измерений*. 2005. № 5. С. 9–12.
20. Улыбин А.В., Васильков С.Д. Использование резистивного электроконтактного метода для контроля напряжённо-деформированного состояния элементов стальных конструкций // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета*. 2009. № 6. С. 155–160. EDN: QLMNUD.
21. Луценко А.Н., Одинцев И.Н., Гриневич А.В., Северов П.Б., Плугатарь Т.П. Исследование процесса деформации материала оптико-корреляционными методами // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 14. С. 70–86. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2014-0-s4-70-86>.
22. Дорофеев В.С., Зинченко А.В. Исследование напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов с учетом технологической поврежденности поляризационно-оптическим методом // *European Cooperation*. 2016. Vol. 19. Iss. 12. P. 48–58.
23. Barile C., Casavola C., Pappaletta G., Pappaletta C. A review of residual stress measurements by HDM and optical techniques // *Machines. Technologies. Materials*. 2017. Vol. 11. Iss. 1. P. 27–29.
24. Meyer H., Epp J. In Situ x-ray diffraction analysis of stresses during deep rolling of steel // *Quantum Beam Science*. 2018. Vol. 2. Iss. 4. P. 20. <https://doi.org/10.3390/qubs2040020>.
25. Одинцев И.Н., Щепинов В.П., Щиканов А.Ю. Применение голографической интерферометрии для измерения остаточных напряжений методом зондирующего отверстия // *Журнал технической физики*. 2003. Т. 73. Вып. 11. С. 106–110. EDN: TTEUVV.
26. Апальков А.А., Ларкин А.И., Осинцев А.В., Одинцев И.Н., Щепинов В.П., Щиканов А.Ю. [и др.]. Голографический метод исследования остаточных напряжений // *Квантовая электроника*. 2007. Т. 37. № 6. С. 590–59.

27. Махутов Н.А., Разумовский И.А., Косов В.С., Апальков А.А., Одинцев И.Н. Исследование остаточных напряжений с применением электронной цифровой спекл-интерферометрии в натуральных условиях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 5. С. 47–51. EDN: JUHLPR.
28. Beghini M., Bertini L., Santus C. A procedure for evaluating high residual stresses using the blind hole drilling method, including the effect of plasticity // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2010. Vol. 45. Iss. 4. P. 301–320. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA579>.
29. Апальков А.А., Одинцев И.Н., Плотников А.С. Оценка диапазона достоверных измерений остаточных напряжений методом сверления отверстий // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 2. С. 47–52. EDN: VPIOUB.
30. Zhang Keming, Li Yong, Xu Min, Ke Youlong. Residual stress release characteristics of hole drilling determined by in-plane three-directional optical interference moiré // Journal of Modern Optics. 2018. Vol. 65. Iss. 21. P. 1362–3044. <https://doi.org/10.1080/09500340.2018.1506519>.
31. Baldi A. On the implementation of the integral method for residual stress measurement by integrated digital image correlation // Experimental Mechanics. 2019. Vol. 59. Iss. 7. P. 1007–1020. <https://doi.org/10.1007/s11340-019-00503-5>.
32. Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М.: Наука, 1985. 224 с.
33. Rickert T. Residual stress measurement by ESPI hole-drilling // 3rd CIRP Conference on Surface Integrity: Procedia CIRP. 2016. Vol. 45. P. 203–206. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.256>.
34. Usov S.M., Razumovsky I.A., Odintsev I.A. Study of inhomogeneous fields of residual stresses using step-by-step enlarged crack method in combination with electronic speckle pattern interferometry // Industrial laboratory. Diagnostics of materials. 2021. Vol. 87. Iss. 9. P. 50–58. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-9-50-58>.
35. Zuev L.B., Barannikova S.A., Lunev A.G., Kolosov S.V., Zharmukhambetova A.M. Basic relationships of the autowave model of a plastic flow // Russian Physics Journal. 2019. Vol. 61. P. 1709–1717. <https://doi.org/10.1007/s11182-018-1591-3>. EDN: PANUBB.
36. Barannikova S., Li Y., Zuev L. Research of the plastic deformation localization of bimetal // Metalurgija. 2018. Vol. 57. Iss. 4. P. 275–278.
37. Zuev L.B., Barannikova S.A., Orlova D.V. Autowave criteria of fracture and plastic strain localization of zirconium alloys // Metals. 2022. Vol. 12. Iss. 1. P. 95. <https://doi.org/10.3390/met12010095>. EDN: MUKZIO.
38. Блюменштейн В.Ю., Жирков А.А., Учайкин С.Е., Кречетов А.А., Махалов М.С. Разработка методик и средств технологического оснащения для исследования пластического течения металла в процессах обработки. Часть 1. Проектирование и изготовление специального настольно-фрезерного станка с ЧПУ для исследования пластического течения металла // Упрочняющие технологии и покрытия. 2022. Т. 18. № 7. С. 311–319. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2022-18-7-311-319>. EDN: JESJUB.
39. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М., Пономарев И.И. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. М.: Наука; Физматлит, 1996. 240 с.
40. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
41. Чепя П.А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным деформированием. Минск: Наука и техника, 1981. 128 с.

References

1. Kostylev V.I., Margolin B.Z. Determination of residual stress and strain fields caused by cladding and tempering of reactor pressure vessels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2000;77:723-735. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(00\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(00)00062-4).
2. Chirkov A.V., Sazanov V.P., Samoylov V.A., Larionov Yu.S. Modeling of redistribution of residual stresses in the cylindrical specimens after advancing surface plastic forming. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta = Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2011;3:171-174. (In Russ.). EDN: TVWGJH.
3. Pokrovskij A.M. Calculation of residual stresses in bimetallic support rolls after heat treatment. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana. Seriya: Seriya Mashinostroyeniye = Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*. 2012;186-196. (In Russ.). EDN: QNUUYV.
4. Hassani-Gangarajab S.M., Carbonib M., Guaglianob M. Finite element approach toward an advanced understanding of deep rolling induced residual stresses, and an application to railway axles. *Materials & Design*. 2015;83:689-703. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.026>.
5. Lyubenova N., Baehre D. Finite element modelling and investigation of the process parameters in deep rolling of AISI 4140 steel. *Journal of Materials Science and Engineering*. 2015;5(7-8):277-287. <http://doi.org/10.17265/2161-6221/2015.7-8.004>.
6. Kukielka L., Szczesniak M., et al. Analysis of the states of deformation and stress in the surface layer of the product after the burnishing cold rolling operation. *Materials Science Forum*. 2016;862:278-287.
7. Radchenko V.P., Saushkin M.N., Bochkova T.I. Mathematical modeling and experimental study of forming and relaxation of the residual stresses in plane samples made of EP742 alloy after the ultrasonic hardening under the high temperature creep conditions. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye, materialovedeniye = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University*. 2016;1:93-112. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.1.07>. EDN: VQTAHL.

8. Saini S., Ahuja I.S., Sharma V.S. Modeling the effects of cutting parameters on residual stresses in hard turning of AISI H11 tool steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;65:667-678. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4206-0>.
9. Huang Xiaoming, Sun Jie, Li Jianfeng. Finite element simulation and experimental investigation on the residual stress-related monolithic component deformation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;77(5-8):1035-1041. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6533-9>.
10. Su Jiann-Cherng, Young A. Keith, Ma Kong, Srivatsa Shesh, Morehouse B. John, Liang Y. Steven Modeling of residual stresses in milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013; 65:717-733. doi 10.1007/s00170-012-4211-3
11. Ji Xia, Zhang Xueping, Liang Y. Steven predictive modeling of residual stress in minimum quantity lubrication machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;70:2159-2168. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5439-2>.
12. Birger I.A. *Residual stresses. Series: Physico-mathematical heritage: physics (mechanics)*. Moscow: Lenand; 2015, 234 p. (In Russ.).
13. Davidenkov N.N. Pipe residual stress measurement. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 1931;1(1):206-218. (In Russ.).
14. Razumovsky I.A. Stress-strain condition studying experimental methods: history, problems, development prospects. *Mashinostroyeniye i inzhenernoye obrazovanie*. 2018;2:17-32. (In Russ.). EDN: XZIJKH.
15. Eleonskiy S.I., Odincev I.N., Pisarev V.S., Usov S.M. Determination of residual stresses and stress intensity factors based on local material removal. *Uchenye Zapiski CAGI*. 2017;48(4):57-77. (In Russ.). EDN: ZDMMQL.
16. Aniskovich E.V., Moskvichev V.V., Makhutov N.A., Razumovskii I.A., Apalkov A.A., Plugatar T.P. Evaluation of residual stresses in the impeller blades of hydraulic units. *Power Technology and Engineering*. 2019;53(1):33-38. <https://doi.org/10.1007/s10749-019-01030-y>. EDN: SAKRHC.
17. Yonezu A., Kusano R., Hiyoshi T., Chen Xi. A method to estimate residual stress in austenitic stainless steel using a microindentation test. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015;24(1):362-372. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1280-5>.
18. Vengrinovich V.L., Vintov D.A., Prudnikov A.N., Podugolnikov P.A., Rabcev V.N. Features of measurement of stresses and deformations in ferromagnets by the Barkhausen noise. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2017;8:10-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.14489/td.2017.08.pp.010-017>. EDN: ZCRNIJ.
19. Pan'kovskiy Yu.P. Hardware implementation of some magnetic methods of non-destructive testing. *Mir izmerenij = Measurements World*. 2005;5:9-12. (In Russ.).
20. Ulybin A.V., Vasilkov S.D. Steel structure elements stress-strain condition control using the resistive electrocontact method. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta. = St. Petersburg Polytechnic University*. 2009;6:155-160. (In Russ.). EDN: QLMNUD.
21. Lucenko A.N., Odincev I.N., Grinevich A.V., Severov P.B., Plugatar T.P. Material deformation study using optical-correlation methods. *Aviacionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*. 2014;14:70-86. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2014-0-s4-70-86>. (In Russ.).
22. Dorofeev V.S., Zinchenko A.V. The bending elements stress-strain condition investigation, taking into account technological damage by the polarization-optical method. *European Cooperation*. 2016;19(12):48-58. (In Russ.).
23. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Pappalettera C. A review of residual stress measurements by HDM and optical techniques. *Machines. Technologies. Materials*. 2017;11(1):27-29.
24. Meyer H., Epp J. In situ x-ray diffraction analysis of stresses during deep rolling of steel. *Quantum Beam Science*. 2018;2(4):20. <https://doi.org/10.3390/qbs2040020>.
25. Odintsev I.N., Shchepinov V.P., Shchikanov A.Yu. Holographic interferometry application for residual stresses measuring using the probing hole method. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Technical Physics Letters*. 2003;73(11):106-110. (In Russ.). EDN: TTEUVV.
26. Apalkov A.A., Larkin A.I., Osintsev A.V., Odintsev I.N., Shchepinov V.P., Shchikanov A.Yu., et al. Holographic method for residual stresses researching. *Kvantovaya elektronika = Lasers & Their Applications*. 2007;37(6):590-594. (In Russ.).
27. Makhutov N.A., Razumovsky I.A., Kosov V.S., Apalkov A.A., Odintsev I.N. Residual stresses investigation in natural conditions using electronic digital speckle interferometry. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2008;74(5):47-51. (In Russ.). EDN: JUHLPR.
28. Beghini M., Bertini L., Santus C. A procedure for evaluating high residual stresses using the blind hole drilling method, including the effect of plasticity. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2010;45(4):301-320. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA579>.
29. Apalkov A.A., Odintsev I.N., Plotnikov A.S. Evaluation of the range of reliable residual stress measurements using hole drilling technique. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2016;82(2):47-52. (In Russ.). EDN: VPIOUB.
30. Zhang Keming, Li Yong, Xu Min, Ke Youlong. Residual stress release characteristics of hole drilling determined by in-plane three-directional optical interference moiré. *Journal of Modern Optics*. 2018;65(21):1362-3044. <https://doi.org/10.1080/09500340.2018.1506519>.
31. Baldi A. On the implementation of the integral method for residual stress measurement by integrated digital image correlation. *Experimental Mechanics*. 2019;59(7):1007-1020. <https://doi.org/10.1007/s11340-019-00503-5>.

32. Klimenko I.S. *Focused images holography and speckle interferometry*. Moscow: Science; 1985, 224 p. (In Russ.).
33. Rickert T. Residual stress measurement by ESPI hole-drilling. In: *3rd CIRP Conference on Surface Integrity: Procedia CIRP*. 2016;45:203-206. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.256>.
34. Usov S.M., Razumovsky I.A., Odintsev I.A. Study of inhomogeneous fields of residual stresses using step-by-step enlarged crack method in combination with electronic speckle pattern interferometry. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2021;87(9):50-58. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-9-50-58>.
35. Zuev L.B., Barannikova S.A., Lunev A.G., Kolosov S.V., Zharmukhambetova A.M. Basic relationships of the autowave model of a plastic flow. *Russian Physics Journal*. 2019;61:1709-1717. <https://doi.org/10.1007/s11182-018-1591-3>. EDN: PANUBB.
36. Barannikova S., Li Y., Zuev L. Research of the plastic deformation localization of bimetal. *Metalurgija*. 2018;57(4): 275-278.
37. Zuev L.B., Barannikova S.A., Orlova D.V. Autowave criteria of fracture and plastic strain localization of zirconium alloys. *Metals*. 2022;12(1):95. <https://doi.org/10.3390/met12010095>. EDN: MUKZIO.
38. Blumenstein V.Yu., Zhirkov A.A., Uchaykin S.E., Krechetov A.A., Makhalov M.S. Developing methods and technological equipment to study metal plastic flow in treatment processes. Part 1. Special milling CNC machine design and manufacture for metal plastic flow research. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and coatings*. 2022;18(7):311-319. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2022-18-7-311-319>. EDN: JESJUB.
39. Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M., Ponomarev I.I. *Residual stresses in deformable solids*. Moscow, Science; 1996, 240 p. (In Russ.).
40. Papshev D.D. *Finishing and strengthening treatment by surface plastic deformation*. Moscow, Mechanical engineering; 1978, 152 p. (In Russ.).
41. Chepa P.A. *Technological basis for part surface deformation hardening*. Minsk: Science and technology; 1981, 128 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Махалов Максим Сергеевич,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры технологии машиностроения,
Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачёва,
650026, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия
✉ maxim_ste@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3266-9724>

Кречетов Андрей Александрович,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры технологии машиностроения,
Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачёва,
650026, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия
krechetovaa@kuzstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7569-7362>

Блюменштейн Валерий Юрьевич,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры технологии машиностроения,
Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачёва,
650026, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия
blumenstein@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3711-1535>

Горбатенко Вадим Владимирович,

к. ф.-м. н.,
старший научный сотрудник,
Институт физики прочности и материаловедения
СО РАН,
634025, г. Томск, Академический просп., 2/4, Россия
gvv@ispms.tsc.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6464-6159>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maksim S. Makhalov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Mechanical Engineering
Technology Department,
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28 Vesennyya St., Kemerovo 650026, Russia
✉ maxim_ste@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3266-9724>

Andrey A. Krechetov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Mechanical Engineering
Technology Department,
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28 Vesennyya St., Kemerovo 650026, Russia
krechetovaa@kuzstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7569-7362>

Valeriy Yu. Blumenstein,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Mechanical Engineering Technology
Department,
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28 Vesennyya St., Kemerovo 650026, Russia
blumenstein@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3711-1535>

Vadim V. Gorbatenko,

Cand. Sci. (Phys.-Math.),
Senior Researcher,
Institute of Strength Physics and Materials Science
SB RAS,
2/4, Akademicheskii pr., Tomsk 634025, Russia
gvv@ispms.tsc.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6464-6159>

Вклад авторов

Махалов М.С. – формирование концепции статьи; разработка методики обработки экспериментальных результатов; моделирование остаточных напряжений в процессах механической обработки экспериментальных образцов; подготовка текста; графическое оформление полученных результатов. Кречетов А.А. – разработка средств автоматизации обработки результатов; первичная фильтрация, обработка, анализ и обобщение экспериментальных результатов; моделирование остаточных напряжений в процессах механической обработки экспериментальных образцов; подготовка текста. Блюменштейн В.Ю. – определение цели и задачи исследования; разработка методики эксперимента; определение граничных условий. Горбатенко В.В. – техническое обоснование задач исследования; выполнение эксперимента и получение первичных результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.09.2023 г.; одобрена после рецензирования 05.10.2023 г.; принята к публикации 20.10.2023 г.

Contribution of the authors

Makhalov M.S. formed the concept of the article, developed the methodology to process experimental results, simulated residual stresses in mechanical treatment processes of experimental samples, prepared the text of the article, provided graphic design of the results obtained. Krechetov A.A. developed automation tools to process results, carried out primary filtering, processing, analysis and summary of experimental results, simulated residual stresses in mechanical treatment processes of experimental samples, prepared the text of the article. Blumenstein V.Yu. formulated the research purpose and objectives, developed experiment methodology, identified boundary conditions. Gorbatenko V.V. provided technical justification of research tasks, performed the experiment and obtained primary results.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 01.09.2023; approved after reviewing 05.10.2023; accepted for publication 20.10.2023.



Прогнозирование и примеры совершенствования абразивного инструмента для бесцентрового шлифования сталей

А.А. Непогожев¹, Б.Я. Мокрицкий^{2✉}, А.А. Скрипилёв³, В.Н. Аникин⁴, С.Б. Марьин⁵

¹АО «Московский машиностроительный завод «Авангард», г. Москва, Россия

^{2,3,5}Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

⁴Московский институт стали и сплавов, г. Москва, Россия

Резюме. Цель работы – повышение эффективности шлифования путем проектирования и выбора рациональных характеристик абразивного инструмента. Объектом исследования являются процессы и закономерности обеспечения безприжогового (бездефектного) шлифования деталей, изготавливаемых из труднообрабатываемой коррозионностойкой нержавеющей стали марки 12X18H10T, никелевого сплава марки ХН60ВТ, конструкционной стали марки 30ХГСА и сложеннолегированной стали марки 12Х2НВФА. В работе использовано имитационное моделирование в программной среде DEFORM. В качестве критерия, регламентирующего обеспечение качественных показателей процесса шлифования, была выбрана температура в зоне резания. Исследования базируются на использовании положений теории резания материалов. Установлено, что каждый из исследованных абразивных инструментов 1 25А F60 O6V, 1 25А F60 Q6V, 1 25А F80 O6V, 1 25А F80 N7V имеет свою рациональную область применения. Для детали «Штырь» экономический эффект, достигнутый за счет исключения брака деталей, вызванного возникающими прижогами на шлифуемой поверхности, составил 18095 руб. С позиций повышения качества обработанной поверхности детали по шероховатости на основе анализа параметра Ra рационально применение малых глубин резания (от 0,05 мм до 0,25 мм) в сочетании с применением частот вращения ведущего круга до 108 мин⁻¹. С позиций обеспечения требуемой точности изготовления детали показано, что целесообразно применение глубин резания до 0,25 мм в сочетании с применением частоты вращения ведущего круга 86 мин⁻¹. Таким образом, разработаны новые концептуальные принципы и методология проектирования (и выбора) абразивных инструментов с обеспечением минимального разупрочнения материала шлифуемой детали, обеспечения требуемой шероховатости поверхности, точности размеров детали и производительности обработки. Дальнейшее развитие работы целесообразно вести с привлечением более крупнозернистых (F40, F36) абразивных инструментов.

Ключевые слова: абразивный режущий инструмент, бесцентровое шлифование, температурный параметр процесса шлифования

Для цитирования: Непогожев А.А., Мокрицкий Б.Я., Скрипилёв А.А., Аникин В.Н., Марьин С.Б. Прогнозирование и примеры совершенствования абразивного инструмента для бесцентрового шлифования сталей // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 51–63. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-51-63>. EDN: JOHNB

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Forecasting and examples of abrasive tool improvement for centerless steel grinding

Andrey A. Nepogozhev¹, Boris Ya. Mokritskii^{2✉}, Aleksandr A. Skripilev³, Vyatcheslav N. Anikin⁴, Sergey B. Maryin⁵

¹JSC Moscow Machine-Building Plant "Avangard", Russia

^{2,3,5}Komsomolsk-na-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

⁴Moscow Institute of Steel and Alloys, Moscow, Russia

Abstract. The present work is aimed at enhancing the grinding efficiency of abrasive tools by designing and selecting their optimal characteristics. To that end, regularities in the process of defect-free grinding of workpieces made of hard-to-machine corrosion-resistant stainless steel of 12X18H10T grade, nickel alloy of XH60BT grade, structural steel of 30XGSA

grade, and complex-alloyed steel of 12X2HBF grade are studied by simulation modeling in the DEFORM software environment. The temperature in the cutting zone is selected as a criterion determining the quality indicators of the grinding process. The research methodology is based on the theory of metal cutting. It was established that each of the investigated abrasive tools, i.e., 1 25A F60 O6V, 1 25A F60 Q6V, 1 25A F80 O6V, and 1 25A F80 N7V is characterized by its rational field of application. For the "Pin" workpiece, the economic effect achieved due to elimination of scrap caused by grinding burns on the ground surface amounted to 18,095 RUB. In terms of the Ra parameter, an improved roughness of the machined surface can be achieved by small cutting depths (from 0.05 mm to 0.25 mm) in combination with a driving wheel speed of up to 108 min⁻¹. The required accuracy of machining can be achieved by cutting depths of up to 0.25 mm in combination with a driving wheel speed of 86 min⁻¹. Hence, a new methodology for designing and selection of abrasive tools is proposed. This methodology ensures minimal softening of the ground material, as well as the required surface roughness, accuracy of workpiece dimensions, and machining performance. In future research, coarser-grained (F40, F36) abrasive tools should be investigated.

Keywords: abrasive cutting tools, centerless grinding, grinding temperature parameter

For citation: Nepogozhev A.A., Mokritskii B.Ya., Skripilev A.A., Anikin V.N., Maryin S.B. Forecasting and examples of abrasive tool improvement for centerless steel grinding. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):00-00. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-51-63>. EDN: JOHNBj.

ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении растет востребованность в использовании труднообрабатываемой нержавеющей стали марки 12X18H10T из-за ее высокой коррозионной стойкости. Соответственно, возникает необходимость [1, 2] в высокопроизводительном шлифовании заготовок деталей, выполненных из этой стали.

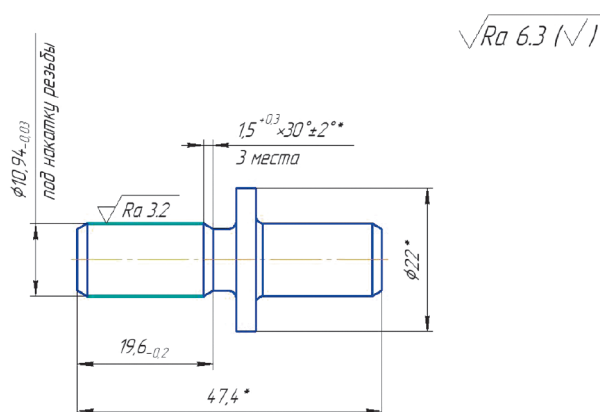
Вопросы совершенствования процесса шлифования рассмотрены подробно в работах [3–18] и в исследованиях других авторов. Достигнут прогресс в совершенствовании конструкций шлифовальных кругов, в оптимизации параметров шлифования, в применении смазывающе-охлаждающих технологических сред. Но это выполнено для типовых конструкционных материалов, для шлифования плоских поверхностей или тел вращения значительных размеров. Для бесцентрового шлифования заготовок деталей малого диаметра (3–10 мм) такие исследования отсутствуют.

Ниже рассмотрены особенности и результаты разработки и применения абразивного инструмента для бесцентрового шлифования заготовок детали «штырь», выполненной из этой стали. Деталь изготавливается в условиях АО «Московский машиностроительный завод «Авангард», входящий в состав АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей».

В работе обоснована необходимость и возможность проектирования и/или выбора абразивных инструментов для эффективного бесцентрового шлифования заготовок указанной детали без прижогов и с обеспечением требуемой точности и шероховатости обра-

ботки. Разработаны рекомендации по проектированию и выбору абразивного инструмента. Их применение позволило снизить трудоемкость проектирования (выбора) абразивного инструмента с 1,5 ч до 2 мин и уменьшить брак деталей до 0,1% по причине прижогов поверхности и погрешности полученных размеров детали.

Эскиз детали «штырь» показан на рис. 1.



*Размеры для справок

Рис. 1. Эскиз детали «штырь» [1] (обозначения сохранены так, как они указаны на чертеже детали, остальные сведения чертежа удалены)

Fig. 1. A sketch of the "pin" part [1] (indications are saved as they are given on the drawing of the part, the rest of the drawing legend is deleted)

После шлифования должен быть получен цилиндр диаметром 10,94_{-0,03}^{+0,03} под последующую накатку резьбы на этой поверхности.

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходной концепции методологии исследования принято следующее:

1. Современные программные средства позволяют использовать разные программные среды для автоматизированного проектирования (и выбора) абразивного инструмента под заданные условия эксплуатации инструмента. Рассмотрена возможность использования программной среды DEFORM [19] под стоящие задачи исследования.

2. Необходимо выяснить критерии и параметры, с помощью которых можно использовать программную среду DEFORM для обеспечения высокоскоростного проектирования абразивного инструмента, обеспечивающего эффективное шлифование с обеспечением минимального разупрочнения материала шлифуемой детали, обеспечения требуемой шероховатости поверхности, точности размеров детали и производительности обработки.

3. Требуется выбрать параметры и критерии, с помощью которых можно осуществлять выбор наиболее рациональных абразивных инструментов и условий шлифования.

Если условно представить программную среду DEFORM как некий «черный ящик», то для получения необходимых указанных выше параметров и критериев эффективного шлифования как *выходных параметров среды*, необходимо ей задать соответствующие *входные параметры, ограничения и критерии*. Некоторое представление об этом дает рис. 2, где показана структурная модель такого проектирования рационального абразивного инструмента.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Один из примеров измерения температуры в зоне резания тепловизором модели Testo 890-1 приведен на рис. 3.

Анализ полученных результатов по средней температуре обрабатываемой поверхности показал, что наименьшая температура зафиксирована при шлифовании абразивным инструментом 25A F60 O6V. Она составляет 550–600°C (рис. 3 а). Максимальная температура (700 и более °C) зафиксирована при шлифовании абразивным инструментом 1 25A F80 O6V (рис. 3 с) и абразивным инструментом 25A F80 N7V (рис. 3 d). Абразивный инструмент 25A F60 Q6V показал промежуточные результаты (температура 650–700°C, рис. 3 b). Из этого следует, что применение абразивного инструмента 25A F80 N7V приво-

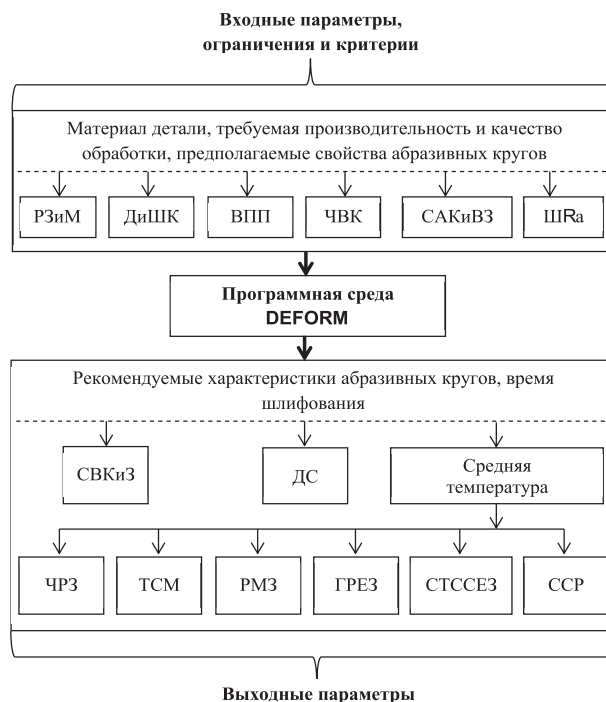


Рис. 2. Структурная модель проектирования абразивного металлорежущего инструмента путем имитационного моделирования в программной среде DEFORM (обозначения: P3иM – размеры заготовки детали и ее материал; ДиШК – диаметр и ширина шлифующего и ведущего абразивных кругов; ВПП – величина поперечной подачи; ЧВК – частота вращения абразивных кругов; САКиВЗ – связки абразивных кругов и вид их зерен; ШRa – требуемая шероховатость Ra шлифуемой поверхности детали; ЧРЗ – число одновременно работающих зерен шлифующего круга; ТСМ – толщина срезаемого металла заготовки детали; РМЗ – расстояние между единичными работающими зернами; ГРЕЗ – средняя глубина резания единичным зерном; СТССЕЗ – средняя толщина среза единичным зерном; ССР – суммарная сила резания; СВКиЗ – скорость вращения абразивного инструмента и заготовки детали; ДС – длина среза материала заготовки)

Fig. 2. Structural model for designing an abrasive metal-cutting tool using DEFORM simulation (indications: P3иM – workpiece dimensions and material; ДиШК – grinding and driving abrasive wheel diameter and width; ВПП – cross feed value; ЧВК – abrasive wheel rotation frequency; САКиВЗ – bonded abrasive wheels and their grain type; ШRa – required roughness Ra of the part ground surface; ЧРЗ – number of simultaneously operating grains of the grinding wheel; ТСМ – workpiece cut metal thickness; РМЗ – distance between single operating grains; ГРЕЗ – single grain average cutting depth; СТССЕЗ – single grain average cut thickness; ССР – total cutting force; СВКиЗ – abrasive tool and workpiece rotation speed; ДС – cutting length of the workpiece material)

Примечание: В тексте далее также использованы обозначения: РХАИ – рекомендуемая характеристика абразивного инструмента; ВПШ – основное время процесса шлифования.

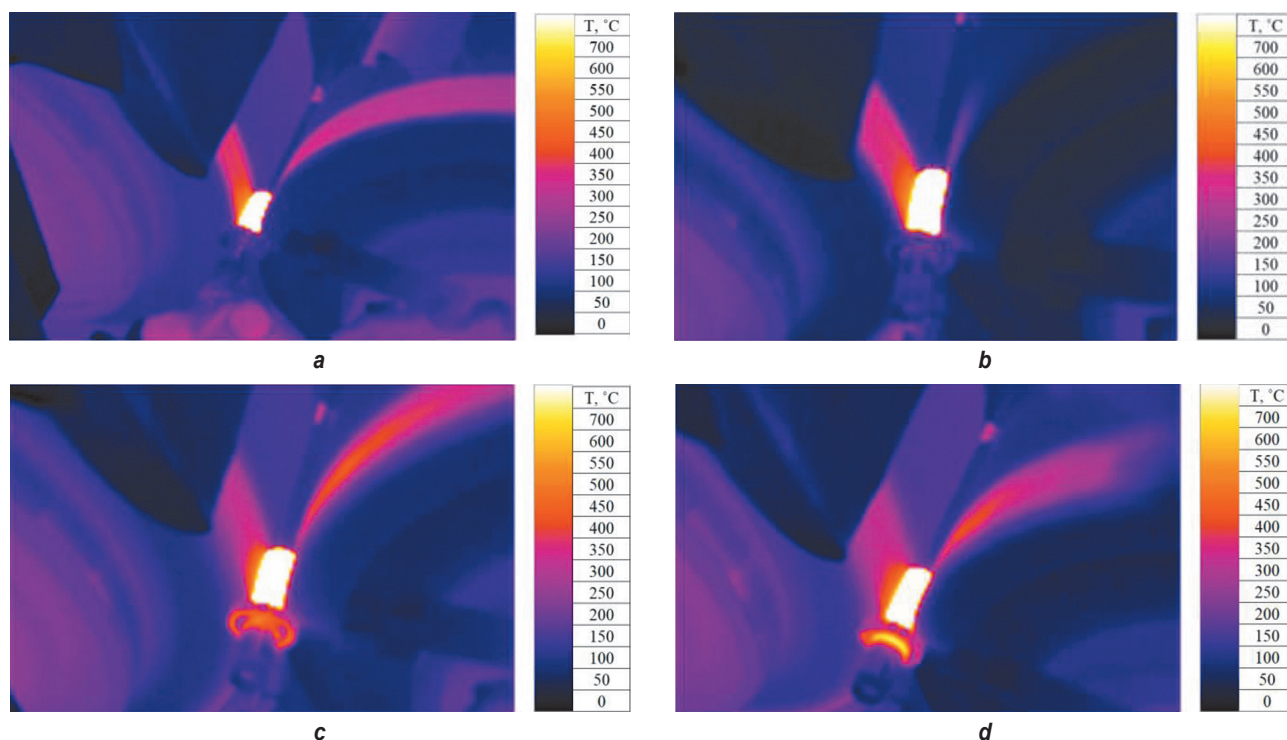


Рис. 3. Температурные картины зоны резания при шлифовании (число оборотов абразивного инструмента 1910 мин^{-1} , частота вращения ведущего круга 42 мин^{-1} , глубина резания $0,1 \text{ мм}$) разными абразивными инструментами: а – 25AF60O6V (зарегистрирована температура $550\text{--}600^\circ\text{C}$); б – 25AF60Q6V (зарегистрирована температура $650\text{--}700^\circ\text{C}$); в – 25AF80O6V (зарегистрирована температура 700 и более $^\circ\text{C}$); д – 25AF80 N7V (зарегистрирована температура 700 и более $^\circ\text{C}$). (Справа на рис. х показаны шкалы температур, светлое пятно в центре рисунков – температурный очаг в зоне резания, слева от очага виден контур ведущего круга, справа – контур абразивного инструмента (шлифование без применения смазывающе-охлаждающей технологической среды (СОТС))

Fig. 3. Temperature pictures of the cutting zone under grinding (abrasive tool revolution number is 1910 min^{-1} , drive wheel rotation speed is 42 min^{-1} , cutting depth is 0.1 mm .) with different abrasive tools: а – 25AF60O6V (recorded temperature is $550\text{--}600^\circ\text{C}$); б – 25AF60Q6V (recorded temperature is $650\text{--}700^\circ\text{C}$); в – 25AF80O6V (recorded temperature is 700°C and higher); д – 25AF80 N7V (recorded temperatures is 700°C and higher). (The Fig. x (on the right) shows temperature scales, the light spot in the center is the temperature focus in the cutting zone, to the left of the focus there is the outline of the drive wheel, to the right there is the outline of the abrasive tool (grinding is free from lubricating-cooling technological medium)

дит к большему выделению тепла в зоне резания, чем при применении остальных абразивных инструментов.

Для достижения цели исследования выполнено измерение твердости и микротвер-

дости материалов, из которых выполнены детали.

Результаты оценки изменения твердости HRB материала до шлифования и после шлифования представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты изменения твердости материала детали «штырь» после шлифования разными абразивными инструментами

Table 1. Results of "pin" part material hardness variation after grinding with different abrasive tools

Обозначение и характеристика абразивного инструмента	Значения твердости по Роквеллу, HRB		
	по чертежу	до шлифования	после шлифования
1 350x100x203 25A F80 O6V	34	32	30
1 350x100x203 25A F60 O6V	34	34	34
1 350x100x203 25A F60 Q6V	34	33	33
1 350x100x203 25A F80 N7V	34	34	31

Примечание. Жирным шрифтом выделены те абразивные инструменты, применение которых привело к существенному (2 и более единиц твердости HRB) снижению твердости материала детали после шлифования.

Полученные результаты показывают, что наибольшую твердость после шлифования обеспечивает абразивный инструмент 1 25А F60 O6V. В отношении абразивных инструментов, указанных в табл. 1 необходимо отметить следующее:

1. У всех инструментов одинаковый материал 25А. Это электрокорунд на керамической связке. Дальнейшие обозначения, приведенные в обозначении характеристик инструмента, указывают на их существенное различие, что и обеспечивает различие по температуре в зоне резания при шлифовании ими.

2. К примеру, обозначение и характеристика абразивного инструмента 1 350х100х203 25А F60 O6V означает: цифра 1 указывает, что абразивный инструмент имеет прямой профиль; цифры 350х100х203 указывают следующие размеры: 350 – наружный диаметр в мм, 100 – ширина в мм, 203 – внутренний (посадочный) диаметр в мм; 25А – материал зерен, электрокорунд белый с характеристиками F60 O6V, где F60 – зернистость, средний размер основной фракции 250 мкм; О – твердость, среднетвердый; 6 – структура, средняя; V – связка керамическая.

3. Характеристика абразивного инструмента 1 350х100х203 25А F80 O6V означает (далее указано только отличие от указанного выше обозначения): F80 – зернистость, средний размер основной фракции 160 мкм.

4. Характеристика абразивного инструмента 1 350х100х203 25А F60 Q6V означает: Q – твердость, на 2 позиции тверже, чем в инструменте с твердостью О.

5. Характеристика абразивного инструмента 1 350х100х203 25А F80 N7V означает: N – твердость, средняя; 7 – структура, средняя, более открытая по сравнению с 6.

Результаты исследования микротвердости HV (для проверки присутствуют ли прижоги на материале детали после шлифования) показаны на рис. 4.

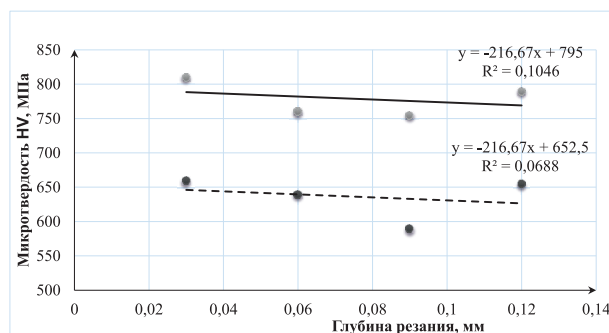


Рис. 4. Зависимость микротвердости HV от глубины шлифования t при применении разных абразивных инструментов: верхняя линия – абразивный инструмент 1 25А F60 O6V; нижняя линия – абразивный инструмент 1 25А F80 O6V

Fig. 4. Dependence of HV microhardness on t grinding depth when using different abrasive tools: top line – 1 25А F60 O6V abrasive tool; bottom line – 1 25А F80 O6V abrasive tool

Таблица 2. Таблица формул, описывающих влияние ряда параметров на качество обработки деталей, выполненных из разных материалов

Table 2. Table of formulas describing the influence of a number of parameters on the processing quality of parts made from different materials

Параметры	Формулы, описывающие зависимости, дисперсия			
	Деталь «Штырь», материал 12Х18Н10Т, абразивный инструмент 1 25А F60 O6V	Деталь «Валик», сплав ХН60ВТ, абразивный инструмент 1 25А F60 O6V	Деталь «Палец», материал 30ХГСА, абразивный инструмент 1 25А F60 O6V	Деталь «Шпилька», материал 12Х2НВФА, абразивный инструмент 1 25А F60 O6V
Зависимость твердости обработанной поверхности детали от глубины t резания	$HRB = -67,87 t + 36,957$ Дисперсия 0,9496	$HRB = -62,857 t + 37,857$ Дисперсия 0,9299	$HRB = -37,143 t + 47,0$ Дисперсия 0,9494	$HRB = -54,286 t + 35,0$ Дисперсия 0,9093
Зависимость твердости обработанной поверхности детали от числа оборотов n ведущего круга	$HRB = -0,0982 n + 32,571$ Дисперсия 0,936	$HRB = -0,0983 n + 33,422$ Дисперсия 0,9662	$HRB = -0,09 n + 47,0$ Дисперсия 0,9511	$HRB = -0,1377 n + 35,66$ Дисперсия 0,9662
Зависимость микротвердости обработанной поверхности детали от глубины t резания	Для 1 25А F80 O6V $HV = -3560,7 t + 4667,1$ Дисперсия 0,9496	$HV = -3328,6 t + 4594,3$ Дисперсия 0,9051	$HV = -1785,7 t + 4998,6$ Дисперсия 0,9812	$HV = -3428,6 t + 4828,6$ Дисперсия 0,963
	Для 1 25А F60 O6V $HV = -216,67 t + 795,0$ Дисперсия 0,9308	–	–	–

Анализ рис. 4 показывает, что разброс величин микротвердости HV значителен, но значения не выходят за пределы допустимых, т.е. шлифование не привело к образованию прижогов. Для абразивного инструмента 1 25A F80 O6V отмечена наименьшая микротвердость. Это свидетельствует о разупрочнении материала детали «штырь» в поверхностном слое. Подтверждением этому являются уравнения регрессии.

HV = $f(t)$, приведенные в табл. 2, даны для всех рассматриваемых деталей.

На рис. 5 показана зависимость качества обработки заготовки детали «штырь» от глубины резания при шлифовании абразивным инструментом 1 25A F60 O6V (частота вращения ведущего круга 42 мин⁻¹). Качество обработки оценено по среднему арифметическому отклонению профиля Ra.

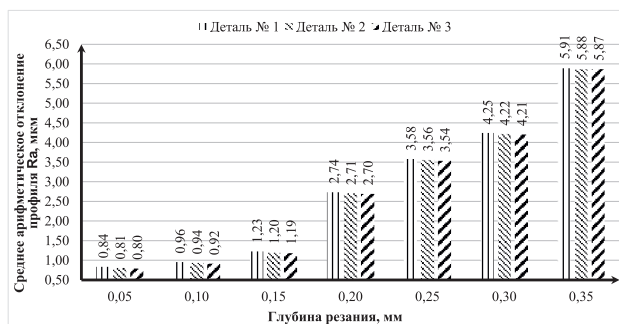


Рис. 5. Влияние глубины резания на параметр Ra шероховатости при шлифовании заготовки детали «штырь» абразивным инструментом 1 25A F60 O6V (частота вращения ведущего круга 42 мин⁻¹)

Fig. 5. Influence of the cutting depth on Ra roughness parameter when grinding the workpiece of the “pin” part with 1 25A F60 O6V abrasive tool (drive wheel rotation speed is 42 min⁻¹)

Из рис. 6 следует, что с ростом глубины резания от 0,05 до 0,35 мм шероховатость ухудшается с Ra 0,81 до Ra 5,88 мкм. Среднее арифметическое отклонение профиля Ra свидетельствует о наличии зависимости параметра Ra от глубины резания. Следовательно, рационально применение малых глубин резания. Эти результаты существенно отличаются от результатов, указанных в работах [4–6]. Но полученные нами результаты подтверждены экспериментально.

На рис. 6 представлены аналогичные экспериментальные данные влияния частоты вращения ведущего круга на параметр Ra.

Из рис. 6 следует, что с ростом частоты вращения ведущего круга отклонение профи-

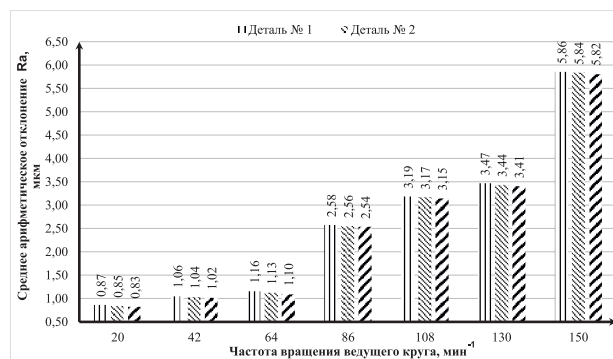


Рис. 6. Влияние частоты вращения ведущего круга на среднее арифметическое отклонение параметра Ra шероховатости при шлифовании заготовки детали «штырь» абразивным инструментом 1 25A F60 O6V (глубина резания 0,1 мм)

Fig. 6. Influence of the drive wheel rotation speed on the arithmetic mean deviation of Ra roughness parameter when grinding the workpiece of the “pin” part with 1 25A F60 O6V abrasive tool (cutting depth is 0.1 mm)

ля Ra зависит существенно, а именно с изменением частоты вращения с 20 мин⁻¹ до 150 мин⁻¹ (диаметр круга 250 мм) параметр Ra возрастает от 0,83 до 5,84 мкм. Анализ среднего арифметического отклонения профиля Ra показывает, что рационально применение частот вращения до 108 мин⁻¹. Ограничение частоты вращения ведущего круга до 108 мин⁻¹ согласуется с результатами, приведенными в работах [7, 8].

Влияние параметров режима резания на качество обработки путем контроля размера детали и на стабильность этого размера показано на рис. 7 и 8.

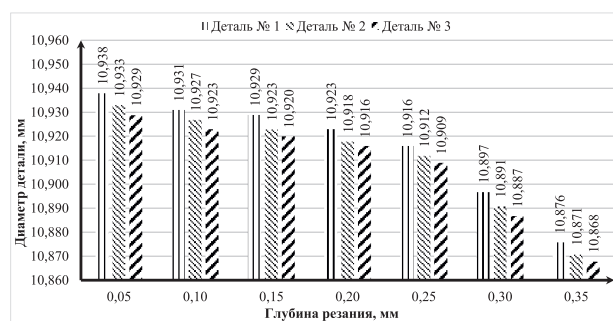


Рис. 7. Зависимость диаметра детали от глубины резания при шлифовании заготовки детали «штырь» абразивным инструментом 1 25A F60 O6V (частота вращения ведущего круга 42 мин⁻¹)

Fig. 7. Dependence of the part diameter on the cutting depth when grinding the workpiece of the “pin” part with 1 25A F60 O6V abrasive tool (drive wheel rotation speed is 42 min⁻¹)

Из рис. 7 следует, что среднеквадратичное отклонение размера фактически постоянное

(от 0,003 до 0,005 мм), изменение значимой цифры происходит в третьем знаке после запятой, а чертежом детали предусматривается возможность отклонения размера $10,94_{-0,03}$ во втором знаке $_{-0,03}$ после запятой. Вывод: это является основанием для того, чтобы считать, что требования чертежа удовлетворены и размер детали не зависит от глубины резания в этом диапазоне.

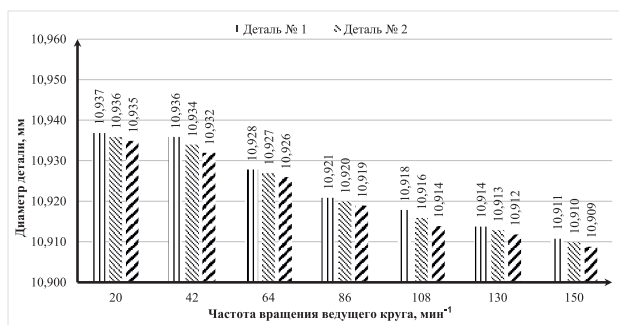


Рис. 8. Зависимость размера детали от частоты вращения ведущего круга при шлифовании заготовки детали «штырь» абразивным инструментом 1 25A F60 O6V (глубина резания 0,1 мм)

Fig. 8. Dependence of the part size on the drive wheel rotation speed when grinding the workpiece of the "pin" part with 1 25A F60 O6V abrasive tool (cutting depth is 0.1 mm)

Из рис. 8 следует, что отклонение размера $10,94_{-0,03}$ зафиксировано в третьей цифре после запятой, а требованием чертежа детали допускается отклонение до второй цифры ($_{-0,03}$) после запятой, т.е. требования чертежа удовлетворены.

Важно было выявить возможности достижения минимальной температуры в зоне шлифования разных деталей. Для этого на рис. 9 показаны минимальные значения температуры в зоне резания при использовании абразивного инструмента 1 25A F60 O6V на примере деталей, выполненных из разных материалов.

Из рис. 9 следует, что изменение температуры при шлифовании заготовок деталей, выполненных из разных материалов, незначительно и происходит в диапазоне 550–570°C. Вывод: абразивный инструмент 1 25A F60 O6V в определенной мере универсален, он применим для любого из материалов рассмотренных деталей.

Вместе с тем аналогичные исследования по максимальным температурам в зоне шлифования показали, что их максимальные значения изменяются в диапазоне 750–810°C. Наименьшее значение максимальной тем-

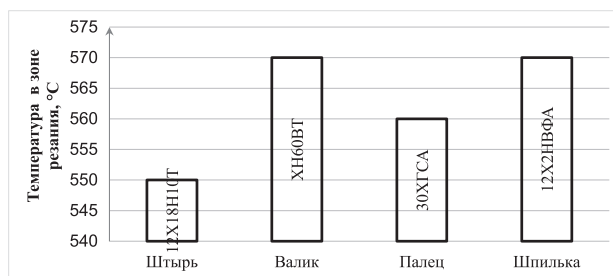


Рис. 9. Минимальные значения температуры в зоне резания при использовании абразивного инструмента 1 25A F60 O6V на примере деталей, выполненных из разных сталей (глубина резания 0,1 мм, частота вращения ведущего круга 42 мин⁻¹)
Fig. 9. Minimum temperature values in the cutting zone when using 1 25A F60 O6V abrasive tool for the case of the parts made from different steels (cutting depth is 0.1 mm, drive wheel rotation speed is 42 min⁻¹)

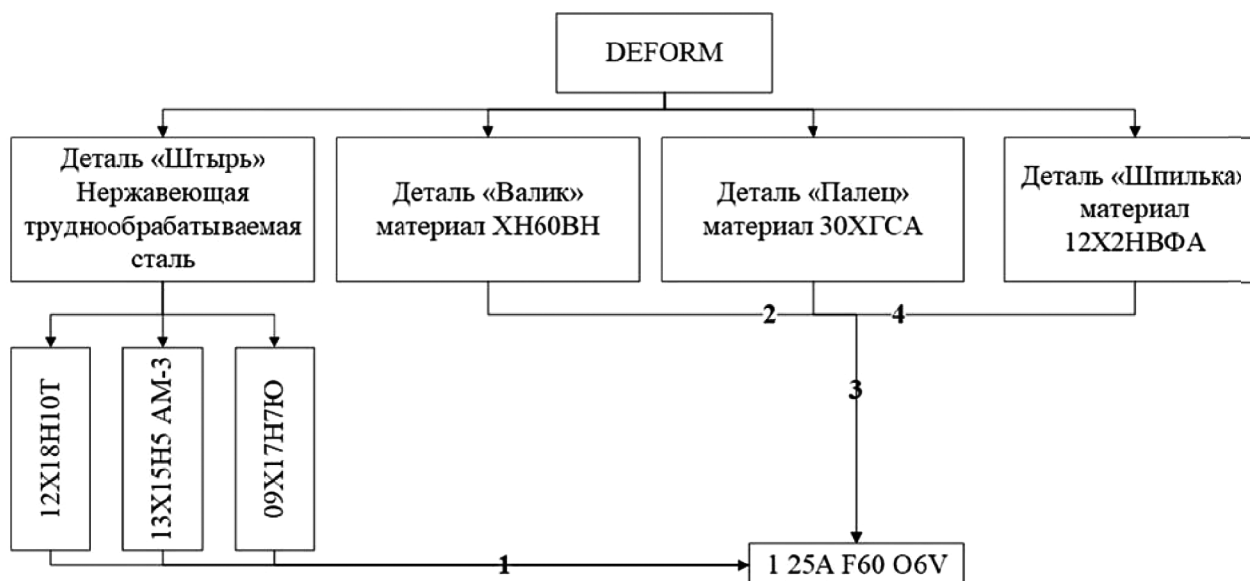
пературы выявлено для абразивного инструмента 1 25A F80 N7V при шлифовании детали «валик», выполненной из никелевого сплава марки ХН60ВТ. Наибольшее значение температуры выявлено при шлифовании абразивным инструментом 1 25A F80 N7V детали «шпилька», выполненной из высоколегированной стали марки 12Х2НБХА. Вывод: одинаковый абразивный инструмент при обработке заготовок деталей, выполненных из разных материалов, приводит к совершенно разным максимальным температурам резания.

Иначе говоря, нет абсолютно плохого абразивного инструмента, но нет и абсолютно хорошего инструмента.

Важно было оценить необходимость и возможность проектирования новых абразивных инструментов для бесцентрового шлифования рассматриваемых деталей, имеющих разные диаметры (особенно для деталей с диаметром 3 мм) и марки материалов. Для этого было выполнено прогнозное моделирование в программной среде DEFORM.

На рис. 10 показана схема реализации принципа разработки универсального абразивного инструмента для всех рассмотренных случаев.

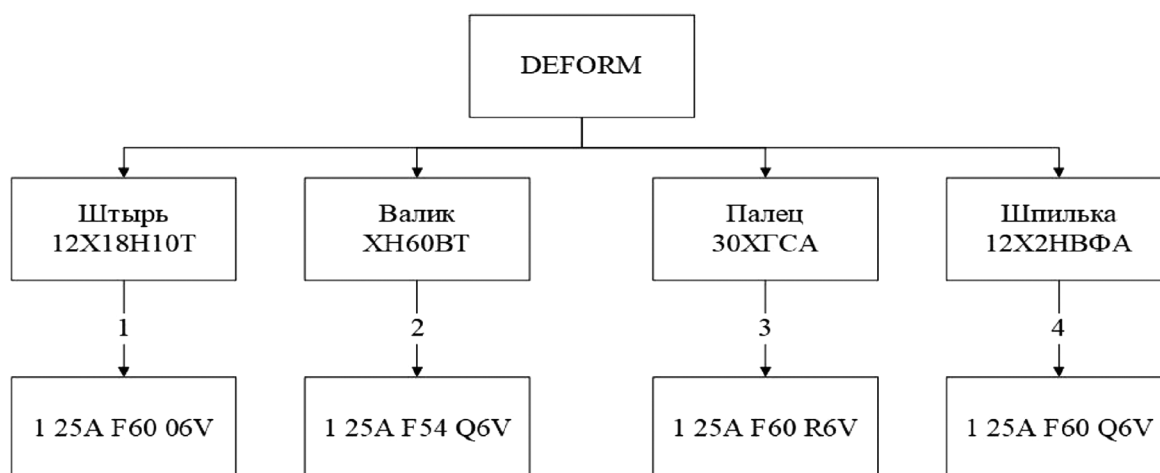
Под реализацией принципа разработки универсального абразивного инструмента для рассмотренных деталей здесь понимаются рекомендации, сформированные программной средой DEFORM по применению абразивных инструментов. Из рис. 10 следует, что универсального инструмента нет, но более всего для этих условий может быть применен абразивный инструмент 1 25A F60 O6V с ограничениями 1–4 (они указаны внутри рис. 10).



1. Не рекомендуется превышать глубину резания 0,25 мм и число оборотов ведущего круга 20 мин⁻¹.
2. Не рекомендуется число оборотов абразивного инструмента более 1000 мин⁻¹, т.е. требуется модернизация станка.
3. Не рекомендуется число оборотов абразивного инструмента более 1900 мин⁻¹, т.е. требуется модернизация станка.
4. Не рекомендуется глубина резания более 0,25 мм и число оборотов абразивного инструмента более 1900 мин⁻¹, т.е. требуется модернизация станка.

Рис. 10. Рекомендации программной среды DEFORM по реализации принципа разработки универсального абразивного инструмента для рассмотренных деталей

Fig. 10. Recommendations of the DEFORM software environment for implementing the principle of universal abrasive tool development for the considered parts



1. Рекомендуется глубина резания до 0,25 мм и число оборотов ведущего круга 20 мин⁻¹.
2. Рекомендовано увеличить число зерен (20 зерен на 1 мм²) на единицу площади абразивного инструмента.
3. Рекомендованы более твердые (до Р, на одну позицию тверже О) абразивные инструменты.
4. Рекомендовано увеличить число зерен (12 зерен на 1 мм²) на единицу площади абразивного инструмента.

Рис. 11. Рекомендации программной среды DEFORM по реализации принципа разработки персонального абразивного инструмента для рассмотренных деталей и материалов, из которых они изготовлены

Fig. 11. Recommendations of the DEFORM software environment for implementing the principle of personal abrasive tool development for the considered parts and materials they are made from

На рис. 11 показана схема реализации принципа разработки персонального абразивного инструмента для каждого из рассмотренных случаев.

Под реализацией здесь понимаются рекомендации, разработанные программной средой DEFORM, по применению абразивного инструмента для каждой из рассмотренных деталей и материалов, из которых они изготовлены, с учетом особенностей 1–4. Из рис. 11 следует, что создание персонального абразивного инструмента возможно. Методические посылы и технические возможности для этого имеются.

Необходимо отметить следующую выявленную особенность. Выше в табл. 1 указано несколько разных характеристик абразивных инструментов. Это те, которые удалось закупить и испытать.

Тем не менее известно, что для снижения температуры в зоне резания применяют большую зернистость. Проведенный анализ показывает, что изменение зернистости круга и, следовательно, изменение концентрации и количества источников тепла несущественно влияют на максимальные значения температур. Но увеличение зернистости приводит к уменьшению числа источников, что в среднем выравнивает эффект концентрации источников тепла. При уменьшении зернистости наблюдается обратная картина.

Для рассматриваемых нами деталей снижение температуры в зоне резания можно достичь применением абразивного инструмента с зернистостью F40. При такой зернистости на одном квадратном миллиметре поверхности инструмента среднее число зерен составляет 5,6. Для сравнения – при зернистости F80 среднее число зерен составляет 28. Это в 5 раз больше, чем у F40. Соответственно, это хуже с позиций снижения температуры.

Есть основания считать, что для шлифования рассматриваемых деталей зернистость F40 более рациональна как средство достижения «бесприжогового шлифования». Это позволяет создать запас по параметру шероховатости Ra (см. рис. 5).

В сводном виде результаты исследований для указанной выше детали «штырь» приведены в табл. 2. В этой же табл. для сравнения приведены результаты по бесцентровому шлифованию других деталей, производимых на АО «Московский машиностроительный

завод «Авангард», выполненных из иных материалов и имеющих значительно меньший диаметр.

Эти результаты новы и не противоречат представлениям, изложенным в работах [9–18, 20].

Сведения, приведенные в табл. 2, позволяют заключить следующее:

1. При оценке зависимости твердости HRB обработанной поверхности детали от глубины резания t выпадают из закономерности два случая:

а) обработка детали «палец» (типовая конструкционная сталь марки 30ХГСА) характеризуется зависимостью $HRB = -37,143 t + 47,0$;

б) обработка детали «шпилька» (специализированная высоколегированная конструкционная сталь марки 12Х2НВФА) характеризуется зависимостью $HRB = -54,286 t + 35,0$.

Именно эти детали имеют очень маленький диаметр (3 мм) из всех рассмотренных в работе деталей. Пока нет возможности связать это выпадение из закономерности именно с малым диаметром деталей или с особенностями материалов, из которых они выполнены, но такой факт выявлен.

2. При оценке зависимости твердости HRB обработанной поверхности детали от числа оборотов n ведущего круга выпадает из закономерности случай обработки детали «Шпилька» (материал 12Х2НВФА). Эта зависимость описывается уравнением $HRB = -0,1377 n + 35,66$.

3. При оценке зависимости микротвердости HV обработанной поверхности детали от глубины резания t выпадают из закономерности три случая:

а) обработка детали «валик» (никелевый сплав ХН60ВТ) характеризуется зависимостью $HV = -3328,6 t + 4594,3$;

б) обработка детали «палец» (типовая конструкционная сталь марки 30ХГСА) характеризуется зависимостью $HV = -1785,7 t + 4998,6$;

в) обработка детали «штырь» (труднообрабатываемая нержавеющей сталь марки 12Х18Н10Т) характеризуется зависимостью $HV = -216,67 t + 795,0$.

4. С ростом глубины резания t усиливается разупрочнение шлифуемой поверхности заготовки детали. Это следует из регрессионных зависимостей, указанных в табл. 2, поскольку

Таблица 2. Таблица формул, описывающих влияние ряда параметров на качество обработки деталей, выполненных из разных материалов

Table 2. Table of formulas describing the influence of a number of parameters on the processing quality of parts made from different materials

Параметры	Формулы, описывающие зависимости, дисперсия			
	Деталь «Штырь», материал 12X18H10T, абразивный инструмент 1 25A F60 O6V	Деталь «Валик», сплав ХН60ВТ, абразивный инструмент 1 25A F60 O6V	Деталь «Палец», материал 30ХГСА, абразивный инструмент 1 25A F60 O6V	Деталь «Шпилька», материал 12Х2НВФА, абразивный инструмент 1 25A F60 O6V
Зависимость твердости обработанной поверхности детали от глубины t резания	$HRB = -67,87 t + 36,957$ Дисперсия 0,9496	$HRB = -62,857 t + 37,857$ Дисперсия 0,9299	$HRB = -37,143 t + 47,0$ Дисперсия 0,9494	$HRB = -54,286 t + 35,0$ Дисперсия 0,9093
Зависимость твердости обработанной поверхности детали от числа оборотов n ведущего круга	$HRB = -0,0982 n + 32,571$ Дисперсия 0,936	$HRB = -0,0983 n + 33,422$ Дисперсия 0,9662	$HRB = -0,09 n + 47,0$ Дисперсия 0,9511	$HRB = -0,1377 n + 35,66$ Дисперсия 0,9662
Зависимость микротвердости обработанной поверхности детали от глубины t резания	Для 1 25A F80 O6V $HV = -3560,7 t + 4667,1$ Дисперсия 0,9496 Для 1 25A F60 O6V $HV = -216,67 t + 795,0$ Дисперсия 0,9308	$HV = -3328,6 t + 4594,3$ Дисперсия 0,9051	$HV = -1785,7 t + 4998,6$ Дисперсия 0,9812	$HV = -3428,6 t + 4828,6$ Дисперсия 0,963

в зависимостях при значениях глубин резания t и частоты оборотов n ведущего круга стоит знак «минус», например, $HRB = -67,87 t + 36,957$ или $HV = -3560,7 t + 4667,1$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложен комплекс новых научно обоснованных технических решений, направленных на совершенствование проектирования и выбора абразивного инструмента, позволяющих повысить эффективность бесцентрового шлифования. Разработанные технические решения созданы с позиций исключения прижогов шлифуемой заготовки деталей, обеспечения требуемого качества обработанной поверхности (по точности размеров детали и шероховатости обработанной детали). Экономический эффект рассчитан применительно к условной программе 1000 шт. деталей. Соответственно к деталям «штырь», «валик», «палец» и «шпилька» условный экономический эффект составил 18095 руб., 6956 руб., 9863 руб. и 5442 руб. Эффект достигнут за счет исключения брака деталей по причине прижога шлифуемой поверхности деталей.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. В качестве критерия совершенствования бесцентрового шлифования предложено использовать минимальную температуру в зоне резания. Под этот критерий разработана новая методология проектирования и выбора абразивных режущих инструментов. Разработаны алгоритмы такого проектирования абразивных инструментов для разных условий шлифования, разработаны программы проектирования характеристик абразивных инструментов. Такое проектирование выполнено с использованием имитационного моделирования, результаты моделирования подтверждены экспериментально. Применение данного критерия обеспечивает исключение прижогов шлифуемой заготовки деталей, обеспечивает требуемые точность размеров детали и шероховатость обработанной детали.

2. Возможность создания нового абразивного инструмента под каждые из рассмотренных условий обработки спрогнозирована имитационным моделированием в программной среде DEFORM.

3. Установлены зависимости выходных параметров процесса шлифования от технологических настроечных значений процесса, а именно:

а) с позиций повышения качества обработанной поверхности детали по шероховатости на основе анализа параметра Ra рационально применение малых глубин резания (от 0,05 мм до 0,25 мм) в сочетании с применением частот вращения ведущего круга до 108 мин⁻¹;

б) с позиций обеспечения требуемой точности изготовления детали установлено, что целесообразно применение глубин резания

до 0,25 мм в сочетании с применением частоты вращения ведущего круга 86 мин⁻¹.

4. С ростом глубины резания t усиливается разупрочнение шлифуемой поверхности заготовки детали. Это следует из регрессионных зависимостей, указанных в табл. 2, поскольку в зависимостях при значениях глубин резания t и частоты оборотов n ведущего круга стоит знак «минус», например, $HRB = -67,87 t + 36,957$ или $HV = -3560,7 t + 4667,1$.

5. Развитие работы целесообразно вести с привлечением более крупнозернистых (F40, F36) абразивных инструментов.

Список источников

1. Непогожев А.А., Желтухин А.В., Крит Б.Л., Морозова Н.В., Эпельфельд А.В., Перетягин П.Ю. Плазменно-электродные покрытия, стойкие при сварке трением с перемешиванием // *Машиностроение: традиции и инновации* (МТИ – 2018): материалы XI Междунар. конф. (г. Москва, 26 июня 2018 г.). М.: МГТУ «СТАНКИН», 2018. 91 с.
2. Романенко А.М., Шатко Д.Б., Непогожев А.А., Караваев Я.С. Обработка шлифованием высоколегированных коррозионностойких сталей на примере 12X18H10T // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*. 2021. № 3. С. 98–106. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-98-106>.
3. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 354 с.
4. Эльянов В.Д. Шлифование в автоматическом цикле. М.: Машиностроение, 1980. 56 с.
5. Ящерицын П.И., Караим И.П. Скоростное внутреннее шлифование деталей подшипников // *Прогрессивные технологические процессы в механосборочном производстве, направленные на повышение производительности труда и качества изделий: сб. статей. Л.: Машиностроение, 1977. 282 с.*
6. Hessel D., Karyazin A., Starkov V.K., Ryabtsev S.A., Gorin N.A. High-efficiency rotary dressing method for cubic boron nitride wheels // *Journal of Superhard Materials*. 2015. Vol. 37. Iss. 3. P. 194–201. <https://doi.org/10.3103/S1063457615030077>.
7. Вознесенский В.А. Современные методы оптимизации композиционных материалов. Киев: Наукова думка, 1988. 144 с.
8. Евсеев Д.Г., Сальников А.Н. Физические основы процесса шлифования. Саратов: Саратовский ун-т, 1978. 128 с.
9. Ozel T., Altan N. Determination of workpiece from stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000. Vol. 40. Iss. 1. P. 133–152. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00051-6).
10. Espinosa C. Modeling high speed machining the SPH method // *X International LS-DYNA Users Conference* (Dearborn, Michigan, 8–10 June 2008). Dearborn, Michigan, 2008. P. 1-1–1-12.
11. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // *Acta Materialia*. 2000. Vol. 48. Iss. 1. P. 1–29. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00285-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00285-2).
12. Okumiyama M., Gripenberg M. Mechanical properties and tribological behavior of TiN-CrAlN and CrN-CrAlN multilayer coatings // *Surface and Coating Technologies*. 1999. Vol. 112. P. 123–128. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00799-3](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00799-3).
13. Byrne G., Dornfeld D., Denkena B. Advancing cutting technology // *CIRP Annals*. 2003. Vol. 52. Iss. 2. P. 483–507. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60200-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60200-5).
14. Ducros C., Benevent V., Savchett F. Deposition, characterization and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools // *Surface and Coatings Technology*. 2003. Vol. 163. Iss. 2. P. 681–688. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00656-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00656-4).
15. Mayrhofer P.H., Willmann H., Mitterer C. Recrystallization and grain growth of nanocomposite Ti-B-N coatings // *Thin Solid Films*. 2003. Vol. 440. Iss. 1-2. P. 174–179. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)00858-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00858-7).
16. Music D., Schneider I.M. Effect of transition metal additives on electronic structure and elastic properties of TiAl and Ti₃Al // *Physical Review*. 2006. Vol. 74. Iss. 17. P. 174110. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.74.174110>.
17. Fuch M., Scheffer M. Ab initio pseudopotentials for electronic structure calculations of poly-atomic systems using density-functional theory // *Computer Physics Communications*. 1998. Vol. 119. P. 67–11. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cond-mat/9807418>.
18. Patent no. 99/131280, Great Britain. Method of making ultrafine WC-CO alloys / A.B. Sandvik, no. PST/SE98/01573. Filed 04.09.98; publ. 18.03.99.
19. Криворучко Д.В., Залогов В.А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография. Сумы: Университетская книга, 2012. 496 с.
20. Рябцев С.А., Полканов Е.Г. Динамика стабильности свойств керамических композиций на основе электрокорунда с увеличением их структурности // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2014. № 6. С. 25–28.

References

1. Nepogozhev A.A., Zheltuhin A.V., Krit B.L., Morozova N.V., Epel'fel'd A.V., Peretyagin P.Yu. Plasma-electrolyte coatings resistant to friction stir welding. In: *Mashinostroenie: tradicii i innovacii (MTI – 2018): materialy XI Mezhdunarodnoj konferencii = Mechanical engineering: traditions and innovations (MIT - 2018): materials of the 11th International conference*. Moscow: Moscow State University of Technology "Stankin"; 2018, 91 p. (In Russ.).
2. Romanenko A.M., Shatko D.B., Nepogozhev A.A., Karavaev Ya.S. Abrasive machining of high-alloy corrosion resistant steels by example of 12Kh18N10T. *Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antej" = Journal of "Almaz – Antey" Air and Space Defence Corporation*. 2021;(3):98-106. (In Russ.). <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-98-106>.
3. Starkov V.K. *Grinding with highly porous wheels*. Moscow: Mashinostroenie; 2007, 354 p. (In Russ.).
4. Elyanov V.D. *Automatic cycle grinding*. Moscow: Mashinostroenie; 1980, 56 p. (In Russ.).
5. Yashchericyn P.I., Karaim I.P. High-speed internal grinding of bearing parts. In: *Progressivnye tekhnologicheskie processy v mekhanosbornochnom proizvodstve, napravlennye na povysenie proizvoditel'nosti truda i kachestva izdelij: sbornik statej = Progressive technological processes in mechanical assembly production to increase labor efficiency and product quality: collection of articles*. Leningrad: Mashinostroenie; 1977, 282 p. (In Russ.).
6. Hessel D., Karyazin A., Starkov V.K., Ryabtsev S.A., Gorin N.A. High-efficiency rotary dressing method for cubic boron nitride wheels. *Journal of Superhard Materials*. 2015;37(3):194-201. <https://doi.org/10.3103/S1063457615030077>.
7. Voznesensky V.A. *Modern methods for composite material optimization*. Kyiv: Naukova Dumka; 1988, 144 p. (In Russ.).
8. Evseev D.G., Salnikov A.N. *Physical foundations of the grinding process*. Saratov: Saratov State University; 1978, 128 p. (In Russ.).
9. Ozel T., Altan N. Determination of workpiece from stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000;40(1):133-152. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00051-6).
10. Espinosa C. Modeling high speed machining the SPH method. In: *X International LS-DYNA Users Conference*. 8–10 June 2008, Dearborn, Michigan. Dearborn, Michigan; 2008, p. 1-1–1-12.
11. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Acta Materialia*. 2000;48(1):1-29. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00285-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00285-2).
12. Okumiya M., Gripenrog M. Mechanical properties and tribological behavior of TiN-CrAlN and CrN-CrAlN multilayer coatings. *Surface and Coating Technologies*. 1999;112:123-128. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00799-3](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00799-3).
13. Byrne G., Dornfeld D., Denkena B. Advancing cutting technology. *CIRP Annals*. 2003;52(2):483-507. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60200-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60200-5).
14. Ducros C., Benevent V., Savchette F. Deposition, characterization and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools. *Surface and Coatings Technology*. 2003;163(2):681-688. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00656-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00656-4).
15. Mayrhofer P.H., Willmann H., Mitterer C. Recrystallization and grain growth of nanocomposite Ti-B-N coatings. *Thin Solid Films*. 2003;440(1-2):174-179. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)00858-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00858-7).
16. Music D., Schneider I.M. Effect of transition metal additives on electronic structure and elastic properties of TiAl and Ti₃Al. *Physical Review*. 2006;B 74:174110. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.74.174110>.
17. Fuch M., Scheffer M. Ab initio pseudopotentials for electronic structure calculations of poly-atomic systems using density-functional theory. *Computer Physics Communications*. 1998;119:67-11. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cond-mat/9807418>.
18. Sendvik A.B. *Method of making ultrafine WC-CO alloys*. Patent GB, no. 99/131280; 1999.
19. Krivoruchko D.V., Zaloga V.A. *Cutting process modeling using the finite element method: methodological foundations: monograph*. Sumy: Universitetskaya kniga; 2012, 496 p. (In Russ.).
20. Ryabtsev S.A., Polkanov E.G. Stability properties dynamics of ceramic composites based on aluminium oxide with structure increasing. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2014;6:25-28. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Непогожев Андрей Александрович,
начальник бюро режущего инструмента,
АО «Московский машиностроительный завод «Авангард»,
125130, г. Москва, ул. Клары Цеткин, 33, корп. 35, Россия
andrey.nepogozhev@gmail.com

Мокрицкий Борис Яковлевич,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры «Машиностроение»,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия
✉ boris@knastu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4727-9873>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey A. Nepogozhev,
Head of the Cutting Tools Bureau,
JSC Moscow Machine-Building Plant "Avangard",
33 Klara Zetkin St., bldg. 35, Moscow 125130, Russia
andrey.nepogozhev@gmail.com

Boris Ya. Mokritskii,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Mechanical Engineering,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin pr., Komsomolsk-on-Amur 681013, Russia
✉ boris@knastu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4727-9873>

Скрипилёв Александр Александрович,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры «Электромеханика»,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия
Skripilev.aal@email.knastu.ru

Аникин Вячеслав Николаевич,
к.т.н.,
доцент кафедры функциональных наносистем
и высокотемпературных материалов,
заведующий Научно-технического центра,
Всероссийский научно-исследовательский
и проектный институт твердых сплавов и
тугоплавких металлов,
Московский институт стали и сплавов,
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, Россия
anikin47_47@mail.ru

Марьин Сергей Борисович,
д.т.н., доцент,
заведующий кафедрой «Авиационное»,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия
maryinsb@mail.ru

Aleksandr A. Skripilev,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Engineering Technology
Department,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin pr., Komsomolsk-on-Amur 681013, Russia
Skripilev.aal@email.knastu.ru

Vyatcheslav N. Anikin,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Functional
Nanosystems
and High Temperature Materials,
Head of the Scientific and Technical Center at the
All-Russian Research and Design Institute of Hard Alloys and
Refractory Metals,
Moscow Institute of Steel and Alloys,
4 Leninsky pr., Moscow 119049, Russia
anikin47_47@mail.ru

Sergey B. Maryin,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Aviation Engineering Department,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin pr., Komsomolsk-on-Amur 681013, Russia
maryinsb@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this 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 16.11.2023 г.; одобрена после рецензирования 10.12.2023 г.; принята к публикации 25.12.2023 г.

Information about the article

The article was submitted 16.11.2023; approved after reviewing 10.12.2023; accepted for publication 25.12.2023.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.9.047

EDN: EQVRDD

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-64-71



Моделирование электрического поля при электрохимическом формообразовании полости тонкостенной детали

Н.А. Швалева^{1✉}, А.А. Фадеев², И.Я. Шестаков³

¹⁻³Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия

Резюме. Цель – моделирование электрического поля в межэлектродном зазоре в условиях электрохимического формообразования полости тонкостенной детали ракетно-космической техники. В исследованиях использовалось моделирование процесса электрохимического формообразования полости при постоянном напряжении в стационарном режиме в среде COMSOL Multiphysics. Моделирование проводилось для схемы электрохимического формообразования с подвижным катодом с вертикальной и горизонтальной подачей к обрабатываемой поверхности заготовки с поддержанием постоянного межэлектродного зазора. Условия моделирования были приняты следующие: материал трубки катода – нержавеющая сталь 12X18H10T; материал тонкостенной детали – алюминиевый сплав АМг6; электролит – раствор NaNO₃. При моделировании электрического поля в межэлектродном зазоре учитывался процесс теплообмена. В ходе моделирования электрического поля при электрохимическом формообразовании полости тонкостенной детали был получен макрос, который позволяет адаптировать моделирование процесса под разные входные условия процесса. В результате моделирования были получены следующие картины распределения: плотности тока в катоде, потенциалов, электрического поля в межэлектродном зазоре и прилегающей к нему области, температуры процесса электрохимического формообразования. Согласно результатам моделирования, установлено, что линии электрического поля направлены к катоду от периферии заготовки. Это означает, что в заданной области происходит анодное растворение материала, что характеризует закон распределения потенциалов в электрохимической ячейке. Согласно полученной при моделировании картине распределения температуры установлено, что ее повышение в зоне обработки незначительное. Показано, что увеличение температуры электролита приводит к пропорциональному увеличению температуры стенки. Таким образом, проведенное исследование дает теоретическое представление изучаемого процесса.

Ключевые слова: электрохимическое формообразование, моделирование, постоянное напряжение, электрическое поле, катод, тонкостенная деталь

Для цитирования: Швалева Н.А., Фадеев А.А., Шестаков И.Я. Моделирование электрического поля при электрохимическом формообразовании полости тонкостенной детали // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 64–71. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-64-71>. EDN: EQVRDD.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Electric field simulation in the electrochemical machining of a thin-walled part cavity

Natalya A. Shvaleva^{1✉}, Aleksandr A. Fadeev², Ivan Ya. Shestakov³

¹⁻³Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The article is aimed at simulating an electric field in the interelectrode gap during the electrochemical machining of a thin-walled part cavity for aerospace equipment. The study involved simulating the process of electrochemical cavity machining at a constant voltage in a steady-state mode in the COMSOL Multiphysics environment. The simulation was carried out for the scheme of electrochemical machining with a movable cathode and vertical and horizontal feeding to the workpiece surface undergoing machining while maintaining a constant interelectrode gap.

The following simulation conditions were adopted: 12Cr18Ni10Ti stainless steel as the material of the cathode tube; AlMg6 aluminum alloy as the material of the thin-walled part; NaNO₃ solution as the electrolyte. When simulating the electric field in the interelectrode gap, the heat exchange process was taken into account. The simulation of the electric field in the electrochemical cavity machining of a thin-walled part yielded a macro that allows the process simulation to be adapted to different input process conditions. As a result of the simulation, the following distribution patterns were obtained: current density in the cathode, potentials, electric field in the interelectrode gap and adjacent area, and process temperature of electrochemical machining. The simulation results show that the electric field lines are directed toward the cathode from the workpiece periphery. This means that anodic dissolution of material occurs in a given region, which characterizes the law concerning the distribution of potentials in an electrochemical cell. The temperature distribution pattern obtained in the simulation revealed that a temperature increase in the machining zone is insignificant. An increase in electrolyte temperature is shown to result in a proportional increase in wall temperature. Thus, the conducted study provides a theoretical insight into the examined process.

Keywords: electrochemical shaping, modeling, direct current voltage, electric field, cathode, thin-walled part

For citation: Shvaleva N.A., Fadeev A.A., Shestakov I.Ya. Electric field simulation in the electrochemical machining of a thin-walled part cavity. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):64-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-64-71>. EDN: EQVRDD.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день обработка тонкостенных и легкодеформируемых деталей является актуальной проблемой. Это можно объяснить тем, что детали данного конструктивного типа обрабатываются фрезерованием. В процессе обработки возможна деформация тонких стенок вследствие механического контакта фрезы с обрабатываемой поверхностью. Кроме этого, большая часть материала уходит в стружку. В связи с чем следует рассмотреть альтернативные методы обработки, основанные на других законах физики.

В современном машиностроении широко используются электрохимические методы формообразования. Перспективным направлением применения электрохимических методов являются формообразующие, а также отделочные операции изготовления деталей.

Метод электрохимического формообразования (ЭХФ) представляет собой процесс изготовления деталей из металлов и сплавов с заданными размерами, формой и качеством поверхности. В этом процессе металл удаляется из определенных участков путем локального электрохимического растворения⁴ [1–6]. При ЭХФ электрод-инструмент (катод) и заготовка (анод) разделены межэлектродным зазором (МЭЗ), который заполнен раствором электролита. За счет этого обеспечивается отсутствие механического контакта инструмента с заготовкой. Из чего следует, что сравнительно малые давления не могут деформировать тонкую стенку детали и, кро-

ме того, практически отсутствует износ инструмента.

Однако необходимо отметить, что отсутствие прямого контакта инструмента с заготовкой является существенным недостатком в процессе электрохимического формообразования. Это приводит к снижению точности обработки. Помимо этого, к отклонению формы получаемой детали от заданной приводит низкая локализация процесса съема материала. Это объясняется тем, что в процессе ЭХФ происходит растворение материала не только в зоне обработки, но и на прилегающих к ней участках поверхности детали. Повысить точность обработки можно рядом предупреждающих мер: подбор состава электролита, кинематика движения катода, управление режимами обработки [7]. Помимо прочего, широко применяют локализацию процесса электрохимического формообразования за счет нанесения диэлектрических покрытий на заготовку.

При ЭХФ характер и значение технологического напряжения (тока), генерируемого источником технологического напряжения (тока), оказывают влияние на скорость анодного растворения металла [8]. Процесс ЭХФ может протекать при постоянном или импульсном напряжении. В силу особенностей протекания процесса метод ЭХФ является перспективным для изготовления тонкостенных и легкодеформируемых деталей.

Целью исследования является моделирование электрического поля при электрохи-

⁴Радкевич М.М., Никифоров В.И., Барон Ю.М., Кобчиков В.С., Коротких М.Т. Электрофизические и электрохимические методы обработки в машиностроении: учебник. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 532 с.

мическом формообразовании полости тонкостенной детали в среде COMSOL Multiphysics.

В связи с этим в статье будут представлены схема процесса и входные параметры электрохимического формообразования, необходимые для моделирования. А также будут показаны результаты моделирования электрохимического формообразования при постоянном напряжении.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электрохимическое формообразование – сложный процесс, который подчиняется законам электрохимии, электромагнитного поля, гидродинамики и тепломассообмена. В связи с этим, используя исследования особенностей этого процесса и их математическое представление, формируется общее математическое описание процесса электрохимического формообразования [9]. Во время электрохимического формообразования электролит в межэлектродном зазоре нагревается за счет прохождения через него рабочего тока. Из-за неравномерной плотности внутреннего источника тепла во всем объеме межэлектродного пространства, которая вызвана изменением удельной электропроводности среды, температура будет распределяться соответствующим образом. В процессе электрохимического формообразования выделившееся тепло передается в катод, обрабатываемую деталь и отводится за счет непрерывной прокачки потока электролита. Для расчета изменения температуры по всему объему МЭЗ используют средние значения температуры в сечениях. Поэтому при моделировании электрического поля необходимо учитывать процессы теплообмена.

Проанализированы исследования [10–17], где осуществлялось моделирование процесса электрохимического формования в различных программных комплексах. Также известны работы [18–20], которые представляют программы для расчета плотности тока, интегрированные с универсальными системами проектирования.

В рамках работы в COMSOL Multiphysics было проведено моделирование процесса электрохимического формообразования в стационарном режиме, при котором скорость подачи инструмента к заготовке остается постоянной. В данном случае съем в каждой точке поверхности заготовки компенсируется

перемещением участков катода и межэлектродный зазор (a) (рис. 1) не изменяет свою форму со временем.

Существует специальная конструкция катода, которая копирует форму полости получаемой тонкостенной детали [8]. Принцип работы электрохимического формообразования заключается в следующем: под давлением электролит поступает в катод, затем через отверстия в трубке катода воздействует на обрабатываемый материал.

Электрохимическое формообразование с постоянным напряжением осуществляется по схеме с подвижным катодом с вертикальной (V_z) и горизонтальной (V_y) подачей к заготовке с поддержанием постоянного межэлектродного зазора (a) (рис. 1).

Программа COMSOL Multiphysics работает следующим образом:

- выполняется первичная настройка модели;
- выбирается размерность пространства;
- определяются физический интерфейс поставленной задачи и тип исследования;
- происходит графическое задание геометрии модели;
- осуществляется выбор материалов;
- задание глобальных определений задачи исследования;
- задание граничных условий расчета;
- происходит построение сетки конечных элементов;
- производится расчет.

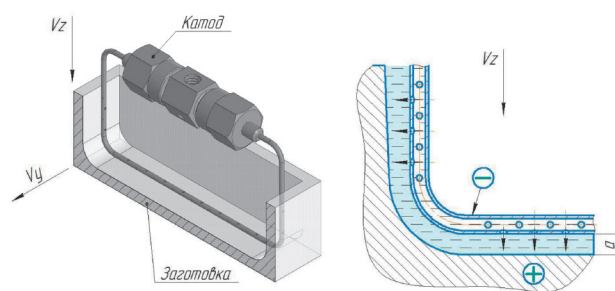


Рис. 1. Схема электрохимического формообразования тонкостенной детали профильным катодом
Fig. 1. Diagram of electrochemical shaping of a thin-walled part with a profile cathode

Условия моделирования следующие:

- материал трубки катода – нержавеющая сталь 12X18H10T ГОСТ 5632-2014;
- материал тонкостенной детали – алюминиевый сплав АМг6 ГОСТ 4784-97;
- электролит NaNO_3 .

Параметры моделирования
 Modeling parameters

Наименование	Обозначение	Значение
Диаметр трубки	d , мм	3
Размер полости детали	длина x высота, мм	76 x 25
Межэлектродный зазор	a , мм	0,05
Приложенное напряжение	U , В	20
Тип напряжения	постоянное	—
Ток	I , А	10
Входное значение температуры электролита	$T_{вх}$, °С	20

Параметры процесса электрохимического формообразования, необходимые для моделирования, представлены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе моделирования электрического поля при электрохимическом формообразовании полости тонкостенной детали был получен макрос, позволяющий адаптировать моделирование процесса к различным входным параметрам процесса.

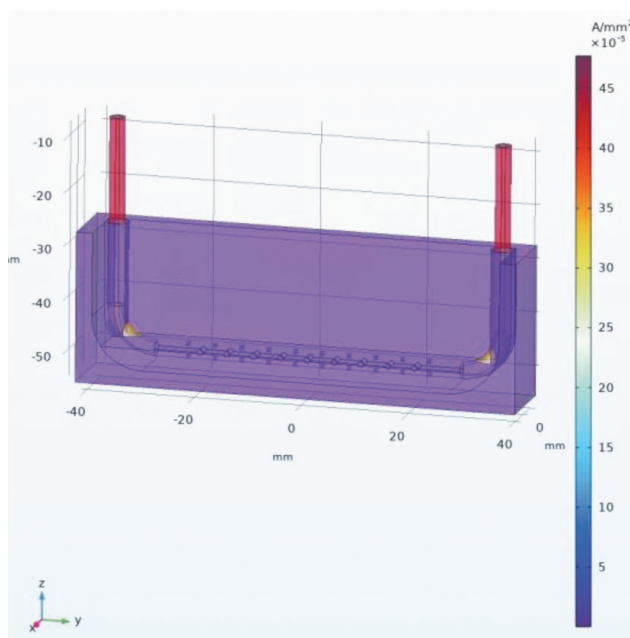
В результате моделирования были получены:

- графическое изображение распределения плотности тока в катоде (рис. 2 а) и распределения потенциалов (рис. 2 б);
- графическое изображение распреде-

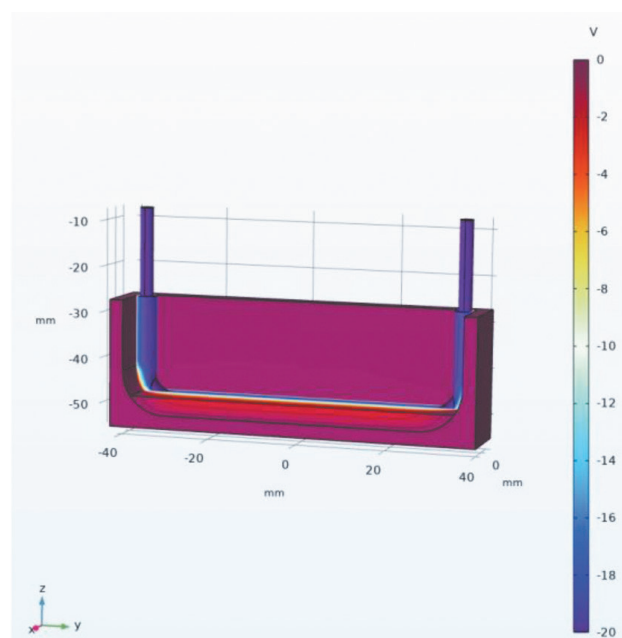
ления электрического поля (рис. 3 а) в межэлектродном зазоре и прилегающей к нему области;

- характер распределения температуры процесса электрохимического формообразования (рис. 3 б).

Результаты моделирования характеризуют процесс электрохимического формообразования. Из результатов моделирования следует, что линии направлены к катоду от периферии заготовки. Это означает, что в заданной области происходит растворение материала, что характеризует закон распределения потенциалов в электрохимической ячейке. Прилегающие поверхности, не участвующие в обработке, должны быть изолированы. Результат температурного распределения показывает незначительное повышение темпера-



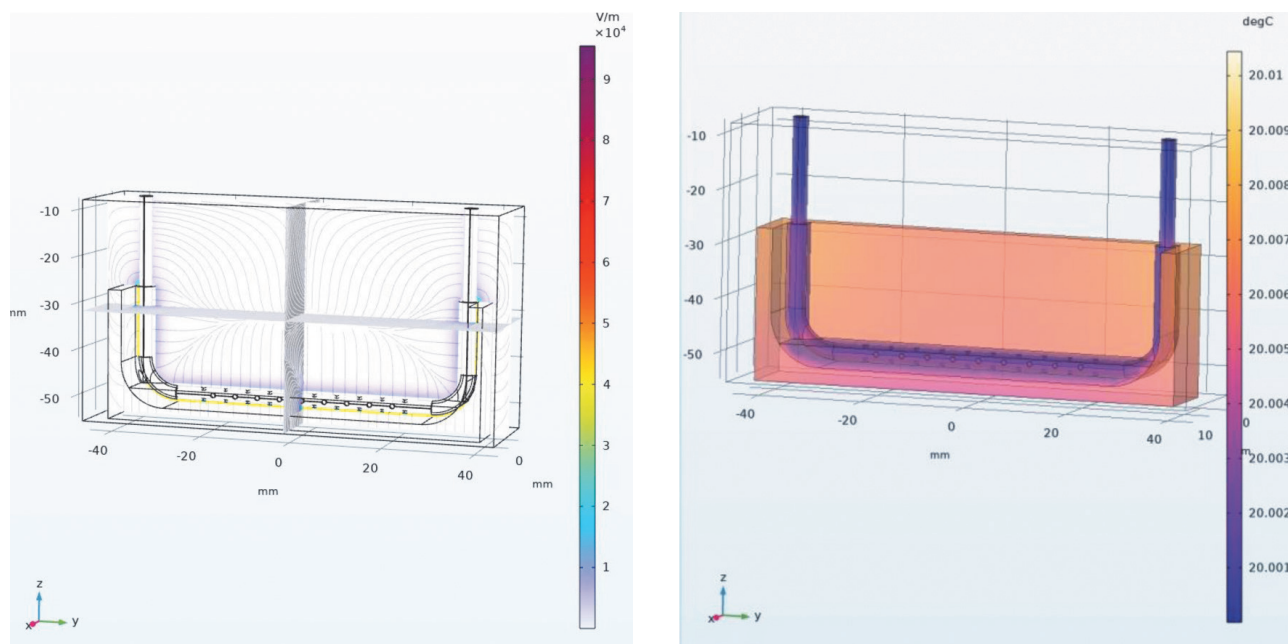
a



b

Рис. 2. Результаты моделирования: а – распределение плотности тока; б – распределение потенциалов

Fig. 2. Modeling results: a – current density distribution; b – potential distribution



а **б**
Рис. 3. Результаты моделирования: а – распределение электрического поля;
б – распределение температуры
Fig. 3. Modeling results: a – electric field distribution; b – temperature distribution

туры в зоне обработки. Это объясняется тем, что в процессе электрохимической обработки в межэлектродном пространстве происходит нагрев электролита под воздействием рабочего тока. В процессе обработки тепло передается через катод, обрабатываемую деталь и уносится потоком электролита. Увеличение температуры электролита приводит к пропорциональному увеличению температуры стенки. В силу того, что процесс происходит при непрерывной прокачке электролита, в реальных условиях электрохимического формообразования изменением температуры можно пренебречь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование дает теоретическое представление процесса. По окончании проведенной работы была достигнута поставленная цель исследования, а именно – выполнено моделирование распределения электрического поля при электрохимическом формообразовании полости тонкостенной детали в среде COMSOL Multiphysics. Изучен вопрос влияния особенностей теплообмена на электрический аспект процесса ЭХФ. Кроме того, был получен макрос, с помощью которого можно моделировать условия электрохимического формообразования с разными входными параметрами.

Список источников

1. Давыдов А.Д., Волгин В.М., Любимов В.В. Электрохимическая размерная обработка металлов: процесс формообразования // Электрохимия. 2004. Т. 40. № 12. С. 1438–1480. EDN: OXEOVN.
2. Rajurkar K.P., Sundaram M.M., Malshe A.P. Review of electrochemical and electrodischarge machining // Procedia CIRP. 2013. Vol. 6. P. 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.002>.
3. Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин. М.: Машиностроение, 1976. 302 с.
4. Li Shicheng, Ming Pingmei, Zhang Junzhong, Zhang Yunyan, Yan Liang. Concurrently fabricating precision meso- and microscale cross-scale arrayed metal features and components by using wire-anode scanning electroforming technique // Micromachines. 2023. Vol. 14. Iss. 5. P. 979. <https://doi.org/10.3390/mi14050979>.
5. Пеньков А.А. Электрохимическая обработка с импульсами наносекундной длительности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 2. С. 236–240. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-2-236-241>. EDN: FPFLKT.
6. Kibra G., Bhattacharyya B., Davim J.P. Non-traditional micromachining processes: fundamentals and applications. Berlin: Springer, 2017. 422 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52009-4>.
7. Силкин С.А., Аксенов Е.Н., Ликризон Е.А., Петренко В.И., Дикусар А.И. Локализация анодного растворения жаро-

- прочных хромоникелевых сплавов в условиях импульсной электрохимической размерной обработки // *Elektronnaya Obrabotka Materialov*. 2019. № 2. С. 1–9. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2629536>.
8. Волгин В.М., Сидоров В.Н., Кабанова Т.Б., Давыдов А.Д. Влияние формы импульсов напряжения на электрохимическую обработку // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021. № 10. С. 611–618. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-10-611-619>. EDN: VCNOZJ.
9. Швалева Н.А., Фадеев А.А., Шестаков И.Я. Особенности процесса электрохимической обработки тонкостенных деталей катодом-инструментом // *Системы. Методы. Технологии*. 2022. № 3. С. 37–42. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-3-37-42>. EDN: QGYZOY.
10. Сидоров В.Н., Волгин В.М. Моделирование электрохимической обработки вращающимися электродами // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. № 5. С. 453–458. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-5-453-458>. EDN: SKIYRU.
11. Ren Zhiyuan, Wang Dengyong, Cui Guowei, Cao Wenjian, Zhu Di. Optimize the flow field during counter-rotating electrochemical machining of grid structures through an auxiliary internal fluid flow pattern // *Precision Engineering*. 2021. Vol. 72. Iss. 13. P. 448–460. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.06.008>.
12. Wang Dengyong, Li Jinzheng, He Bin, Zhu Di. Analysis and control of inter-electrode gap during leveling process in counter-rotating electrochemical machining // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2019. Vol. 32. Iss. 11. P. 2557–2565. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.08.022>.
13. Wang Dengyong, Wang Qianqian, Zhang Jun, Le Huayong, Zhu Zengwei, Zhu Di. Counter-rotating electrochemical machining of intensive cylindrical pillar array using an additive manufactured cathode tool // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. Vol. 211. P. 106653. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106653>.
14. Li Jinzheng, Wang Dengyong, Zhu Di, He Bin. Analysis of the flow field in counter-rotating electrochemical machining // *Journal of Materials Processing Technology*. 2020. Vol. 275. P. 116323. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116323>.
15. Пронищев Н.Д., Палютин С.В., Нехорошев М.В. Моделирование электрических полей в электрохимической ячейке в условиях эхо средствами программного комплекса «ANSYS» // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва*. 2006. № 2-1. С. 317–321. EDN: IPJAZH.
16. Fukukawa M., Tong L. Effect of mass flow induced by a recipro-cating paddle on electroplating // *Effect of Mass Flow Induced by a Reciprocating Paddle on Electroplating: Conference (Boston, 4–6 October 2017)*. Boston, 2017. P. 1–6.
17. Cao Wenjian, Wang Dengyong, Zhu Di. Modeling and experimental validation of interelectrode gap in counter-rotating electrochemical machining // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020. Vol. 187. P. 105920. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105920>.
18. Purcar M., Dorochenko A., Bortels L., Denconinck J., Den Bossche B.V. Advanced CAD integrated approach for 3D electrochemical machining simulations // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 203. Iss. 1-3. P. 58–71. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.082>.
19. Purcar M., Bortels L., Van den Bossche B., Deconinck J. 3D electrochemical machining computer simulations // *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 149. Iss. 1-3. P. 472–478. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.050>.
20. Bortels L., Purcar M., Den Bossche B.V., Deconinck J. A user-friendly simulation software tool for 3D ECM // *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 149. Iss. 1-3. P. 486–492. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.051>.

References

1. Davydov A.D., Volgin V.M., Lyubimov V.V. Electrochemical dimensional processing of metals: shaping process. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2004;40(12):1438-1480. (In Russ.). EDN: OXEOVN.
2. Rajurkar K.P., Sundaram M.M., Malshe A.P. Review of electrochemical and electrodischarge machining. *Procedia CIRP*. 2013;6:13-26. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.002>.
3. Sedykin F.V. *Dimensional electrochemical processing of machine parts*. Moscow: Mashinostroyeniye; 1976, 302 p. (In Russ.).
4. Li Shicheng, Ming Pingmei, Zhang Junzhong, Zhang Yunyan, Yan Liang. Concurrently fabricating precision meso- and microscale cross-scale arrayed metal features and components by using wire-anode scanning electroforming technique. *Micromachines*. 2023;14(5):979. <https://doi.org/10.3390/mi14050979>.
5. Penkov A.A. Electrochemical treatment with nanosecond pulses. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of Tula State University. Technical science*. 2022;2:236-240. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-2-236-241>. EDN: FPFLKT.
6. Kibra G., Bhattacharyya B., Davim J.P. *Non-traditional micromachining processes: fundamentals and applications*. Berlin: Springer; 2017, 422 p.
7. Silkin S.A., Aksenov E.N., Likrizon E.A., Petrenko V.I., Dikumar A.I. Anodic dissolution localization under pulsed electrochemical machining of heat-resistant nickel-chromium alloys. *Elektronnaya Obrabotka Materialov*. 2019;2:1-9. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2629536>.
8. Volgin V.M., Sidorov V.S., Kabanova T.B., Davydov A.D. Effect of the shape of voltage pulses on electrochemical machining. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of Tula State University. Technical science*. 2021;10:611-618. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-10-611-619>. EDN: VCNOZJ.
9. Shvaleva N.A., Fadeev A.A., Shestakov I.Ya. The features of the process of electrochemical machining of thin-walled parts with a cathode tool. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*. 2022;3:37-42. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-3-37-42>. EDN: QGYZOY.

10. Sidorov V.N., Volgin V.M. Modeling of electrochemical machining with rotating electrodes. *Texnicheskie nauki = News of Tula State University. Technical science*. 2022;5:453-458. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-5-453-458>. EDN: SKIYRU.
11. Ren Zhiyuan, Wang Dengyong, Cui Guowei, Cao Wenjian, Zhu Di. Optimize the flow field during counter-rotating electrochemical machining of grid structures through an auxiliary internal fluid flow pattern. *Precision Engineering*. 2021;72(13):448-460. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.06.008>.
12. Wang Dengyong, Li Jinzheng, He Bin, Zhu Di. Analysis and control of inter-electrode gap during leveling process in counter-rotating electrochemical machining. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2019;32(11):2557-2565. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.08.022>.
13. Wang Dengyong, Wang Qianqian, Zhang Jun, Le Huayong, Zhu Zengwei, Zhu Di. Counter-rotating electrochemical machining of intensive cylindrical pillar array using an additive manufactured cathode tool. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021;211:106653. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106653>.
14. Li Jinzheng, Wang Dengyong, Zhu Di, He Bin. Analysis of the flow field in counter-rotating electrochemical machining. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;275:116323. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116323>.
15. Pronichev N.D., Palyutin S.V., Nehoroshev M.V. Modeling of electric fields in an electrochemical cell in conditions of electrochemical processing by means of program Ansys. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta = Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2006;2-1:317-321. (In Russ.). EDN: IPJAZH.
16. Fukukawa M., Tong L. Effect of mass flow induced by a reciprocating paddle on electroplating. In: *Effect of Mass Flow Induced by a Reciprocating Paddle on Electroplating: Conference*. 4–6 October 2017, Boston. Boston; 2017, p. 1-6.
17. Cao Wenjian, Wang Dengyong, Zhu Di. Modeling and experimental validation of interelectrode gap in counter-rotating electrochemical machining. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020;187:105920. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105920>.
18. Purcar M., Dorochenko A., Bortels L., Denconinck J., Den Bossche B.V. Advanced CAD integrated approach for 3D electrochemical machining simulations. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;203(1-3):58-71. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.082>.
19. Purcar M., Bortels L., Van den Bossche B., Deconinck J. 3D electrochemical machining computer simulations. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;149(1-3):472-478. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.050>.
20. Bortels L., Purcar M., Den Bossche B.V., Deconinck J. A user-friendly simulation software tool for 3D ECM. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;149(1-3):486-492. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.051>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Швалева Наталья Александровна,

аспирант,
Сибирский государственный университет науки
и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва,
660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский
рабочий», 31, Россия
✉ natalyashvaleva@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1031-3153>

Natalya A. Shvaleva,

Postgraduate Student,
Reshetnev Siberian State University of Science
and Technology,
31 gazety Krasnoyarsky Rabochy pr., Krasnoyarsk
660037, Russia
✉ natalyashvaleva@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1031-3153>

Фадеев Александр Александрович,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры технология машиностроения,
Сибирский государственный университет науки
и технологий
им. академика М.Ф. Решетнёва,
660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский
рабочий», 31, Россия
fadeev.77@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3171-8528>

Aleksandr A. Fadeev,

Cand. Sci (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mechanical
Engineering Technology,
Reshetnev Siberian State University of Science
and Technology,
31 gazety Krasnoyarsky Rabochy pr., Krasnoyarsk
660037, Russia
fadeev.77@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3171-8528>

Шестаков Иван Яковлевич,

д.т.н., доцент,
профессор кафедры электронной техники
и телекоммуникаций,
Сибирский государственный университет науки
и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва,
660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский
рабочий», 31, Россия
yakovlevish@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7759-5159>

Ivan Ya. Shestakov,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Electronic Engineering
and Telecommunications,
Reshetnev Siberian State University of Science
and Technology,
31 gazety Krasnoyarsky Rabochy pr., Krasnoyarsk
660037, Russia
yakovlevish@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7759-5159>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 12.12.2023 г.; одобрена после рецензирования 10.01.2024 г.; принята к публикации 20.01.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 12.12.2023; approved after reviewing 10.01.2024; accepted for publication 20.01.2024.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.311

EDN: PAGGRY

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-72-83



Формирование суточных графиков нагрузок в экологически дружественном активном энергетическом комплексе

А.М. Глазунова^{1✉}, С.Е. Съемщиков²¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия²Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

Резюме. Целью исследования является решение задачи формирования суточных графиков нагрузок для оптимального управления режимами экологически дружественного (мощность генерируется только на ветровых и солнечных станциях) активного энергетического комплекса, связанного с единой энергосистемой одной линией электропередачи. В исследовании выполнялась корректировка суточных плановых графиков нагрузок, расположенных на территории активного энергетического комплекса, заключающаяся в смещении потребления мощности на другое время суток (потребление мощности откладывается). Проблема оптимального распределения отложенной мощности представляется оптимизационной задачей множественного рюкзака, которая адаптируется к решению поставленной задачи. Апробация предложенного алгоритма была выполнена на 6-узловой схеме по следующему сценарию: сформировать графики нагрузок в активном энергетическом комплексе для обеспечения оптимального управления активным энергетическим комплексом при сохранении перетока мощности из единой энергосистемы в заданных пределах. Проведенные эксперименты по оценке обеспечения бесперебойности в электроснабжении потребителей активного энергетического комплекса в зависимости от исходных данных показали, что структура исходных данных влияет на качество результатов. Установлено, что базовым условием при формировании графиков нагрузки является соблюдение пределов мощности из единой энергосистемы. Анализ полученных результатов показал, что полное исключение нарушения в электроснабжении потребителей активного энергетического комплекса достигается при наличии возможности разделить нагрузку для переноса ее на другие часы суток и при отключении 0,151 МВт в режиме 7. Нагрузка должна быть разделена не менее чем на три части. Отключение 0,151 МВт выполняется для предотвращения отсоединения активного энергетического комплекса от единой энергосистемы, следствием которого будет дефицит мощности 4,652 МВт.

Ключевые слова: активный энергетический комплекс, возобновляемые источники энергии, параметры установившегося режима, управление

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

Для цитирования: Глазунова А.М., Съемщиков С.Е. Формирование суточных графиков нагрузок в экологически дружественном активном энергетическом комплексе // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 72–83. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-72-83>. EDN: PAGGRY.

POWER ENGINEERING

Original article

Design of daily load profiles in environmentally friendly commercial and industrial microgrids

Anna M. Glazunova^{1✉}, Sergei E. Sieemshchikov²¹Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia²Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the study is to solve the problem of design of daily load profiles for optimal control of an environmentally friendly commercial and industrial microgrid (CIM) (power is generated only by renewable energy sources) connected to the power system by a power transmission line. This goal is achieved by adjusting the planned daily load profiles of consumers located on the territory of the CIM. The adjustment means shifting power consumption to another time of the day in question (power consumption is delayed). The problem of the delayed power allocation is represented as an optimization multiple knapsack problem that adapts to the problem-solving process. The proposed algorithm was tested on a 6-node system according to the scenario that involved adjustment of the load profile in the

CIM to ensure that the power flow from the power system remains within specified limits. Compliance with the limits guarantees uninterrupted power supply from the power system, which is a fundamental requirement when developing load profiles. Experiments were carried out to evaluate the delivery of uninterrupted power supply to CIM consumers depending on the initial data. The findings indicate that the disruptions in power supply to CIM consumers are completely eliminated if the load can be divided to shift it to other hours of the day and when the load of 0.151 MW is disconnected in operating state 7. The total load should be divided into at least three parts. Disconnection of 0.151 MW is performed to prevent disconnection of the commercial and industrial microgrid from the power system, which would result in a power deficit of 4.652 MW.

Keywords: commercial and industrial microgrids, renewable energy sources, steady state variables, control

Acknowledgement: The research was carried out under the State Assignment Project (no. FWEU-2021-0001) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation 2021-2030.

For citation: Glazunova A.M., Sieemshchikov S.E. Design of daily load profiles in environmentally friendly commercial and industrial microgrids. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):72-83. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-72-83>. EDN: PAGGRY.

ВВЕДЕНИЕ

Распределенная генерация играет важную роль в энергетике всех стран. Многие промышленные и коммерческие потребители заинтересованы в развитии малой генерации [1]. Наличие собственных генерирующих предприятий дает потребителям перспективу изолироваться от единой энергосистемы (ЕЭС), что положительно сказывается на образовании цены на электроэнергию³ [1]. Большой проблемой изолированных микрогридов, нацеленных на генерацию сравнительно дешевой электроэнергии, является невыполнимость требований, предъявляемых к надежности электроснабжения. Преодоление этого противоречия может быть достигнуто за счет создания микрогридов, связанных с ЕЭС одной линией электропередачи. Такие микрогриды называются активными энергетическими комплексами (АЭК)³ [1, 2]. Появление АЭК в ЕЭС, в свою очередь, не должно приводить к ухудшению условий функционирования ЕЭС, в том числе не может отрицательно сказываться на надежности электроснабжения и качестве электроэнергии. Главным требованием к активному энергокомплексу со стороны внешней сети является не нарушать пределы разрешенной мощности в линии, связывающей АЭК и ЕЭС [2]. При превышении допустимого значения более 10 с выполняется автоматическое отключение объектов АЭК от внешней сети.

АЭК представляет собой локальную ячейку, соединенную с ЕЭС линией электропередачи. АЭК включает в себя собственные электрические станции, электросетевой комплекс,

потребителя и управляемое интеллектуальное соединение (УИС), с помощью которого решаются задача регулирования перетока мощности между АЭК и ЕЭС в рамках заданных значений, а также задача поддержания баланса мощности в АЭК. Для регулирования взаимоотношений между АЭК и ЕЭС и поддержания эффективной работы АЭК разрабатываются специальные правила. Соблюдение этих правил со стороны АЭК требует создания стратегии управления АЭК, в которой большая роль отводится активным потребителям (АП) и системам накопления энергии (СНЭ).

Программы, вовлекающие потребителей участвовать в управлении спросом, широко распространены и применяются по всему миру [3–6]. Каждая программа предполагает различные варианты воздействия на нагрузку потребителя. В [7] описываются разные подходы к управлению спросом в интеллектуальных средах и анализируется информация о способах снижения пиковой нагрузки. Авторы [8] проанализировали существующие стратегии программ управления спросом (Demand-side management, (DSM)), уточнили области их применения и предложили способы для достижения однозначности в терминологии. Главной движущей силой технологии управления спросом является активный потребитель (АП) [9].

Основными функциями СНЭ являются выдача (в режиме разряда) и потребление (в режиме заряда) активной мощности. Наличие этих функций позволяет использовать СНЭ с разными целями, для достижения которых вырабатываются специальные стратегии управ-

³Ассоциация НП Совет Рынка. АО СО ЕЭС. Активные энергетические комплексы – первый шаг к промышленным микрогридам в России. Режим доступа: http://ntc-msk.ru/assets/upload/testimonials/Doklad_AEK_2020.pdf (дата обращения: 23.04.2023).

ления СНЭ. Самым распространенным видом СНЭ являются аккумуляторные батареи на базе литий-ионных накопителей. На их долю приходится наибольшие суммарные мощности и энергоемкости [10]. В [11] представлен метод оптимального размещения накопителей энергии для минимизации потерь энергии из-за снижения пиковых нагрузок при наличии распределенной генерации из возобновляемых источников. Размер хранилища моделируется с учетом графика нагрузки и желаемого снижения пиковых нагрузок.

В настоящее время страны всего мира поставили себе задачи по переходу на возобновляемую энергию. Лидерами инвестиций в развитие возобновляемой энергетики являются Китай, США, Япония и Великобритания. По данным исследовательской службы BloombergNEF глобальные инвестиции в ветровую и солнечную энергетику, биотопливо, биомассу и отходы, малую гидроэлектроэнергетику увеличились в годовом выражении с 33 млрд долл. до более чем 300 млрд долл. за 20 лет.

Авторы [12] представили подробную информацию о микрогридах, в которых используются ВИЭ. В [13] описаны некоторые тренды развития микрогридов в США и методы управления ими. В [14] обсуждается проблема необходимости дальнейших исследований, связанных с микросетями, включая распределенную генерацию, эксплуатацию, методы управления и усиление защиты.

Данная работа посвящена исследованию экологически дружелюбной АЭК, где для генерации электроэнергии используются только возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ. ВХОДНЫЕ И ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В исследовании рассматривается АЭК, где мощность генерируется только на ветровых и солнечных станциях. Анализ установившихся режимов (УР), вычисленных по плановым графикам нагрузок, показывает, что в некоторых режимах возникший дефицит мощности устраняется за счет увеличения перетока из ЕЭС, что через 10 с приведет к отключению АЭК от внешней сети. В этом случае дефицит мощности в АЭК становится больше, чем до отключения линии. Проблема отключения линии может быть решена при ведении электрического режима таким образом, чтобы баланс мощности в АЭК соблюдался не за счет уве-

личения перетока из ЕЭС, а за счет ресурсов АЭК. Использование этих ресурсов позволяет заранее откорректировать суточные плановые графики нагрузок.

Исследование направлено на решение задачи формирования суточных графиков нагрузок для оптимального управления режимами экологически дружелюбного АЭК, связанного с ЕЭС одной линией электропередачи. Поставленная цель достигается путем корректировки суточных плановых графиков нагрузок, расположенных на территории АЭК. Это мероприятие способствует сокращению количества отключений АЭК от ЕЭС, а, следовательно, минимизирует (исключает) нарушения в электроснабжении потребителей АЭК. Управление АЭК рассматривается оптимальным, если выбранные меры, обеспечивающие баланс мощности в АЭК без нарушений в электроснабжении, требуют минимальных затрат.

Требование о бесперебойном электроснабжении из ЕЭС может быть выполнено при строгом соблюдении условия о поддержании перетока из ЕЭС в пределах, заранее согласованных с сетевой организацией. В данной работе проблема корректировки графиков нагрузок решается за счет использования ресурсов АЭК: активных потребителей и систем накопления энергии (батареи).

Активные потребители изменяют свою нагрузку в соответствии с заданной программой управления спросом. В работе рассматривается программа, основанная на технологии смещения нагрузки («load shift»), согласно которой потребление мощности смещается на другое время суток (откладывается). Далее эта мощность называется отложенной мощностью. Эффективное функционирование АЭК возможно при оптимальном распределении отложенной мощности в течение суток. Для поиска искомого распределения решается оптимизационная задача с заданным критерием.

На рис. 1 представлена схема структуры входных и выходных данных задачи оптимизации. На схеме наглядно показана последовательность процесса подготовки входных данных, состав выходных данных и путь их применения для перераспределения мощности (для формирования суточных графиков нагрузки).

Исходной информацией для подготовки входных данных являются плановые графики нагрузок, прогнозные мощности ветровой и

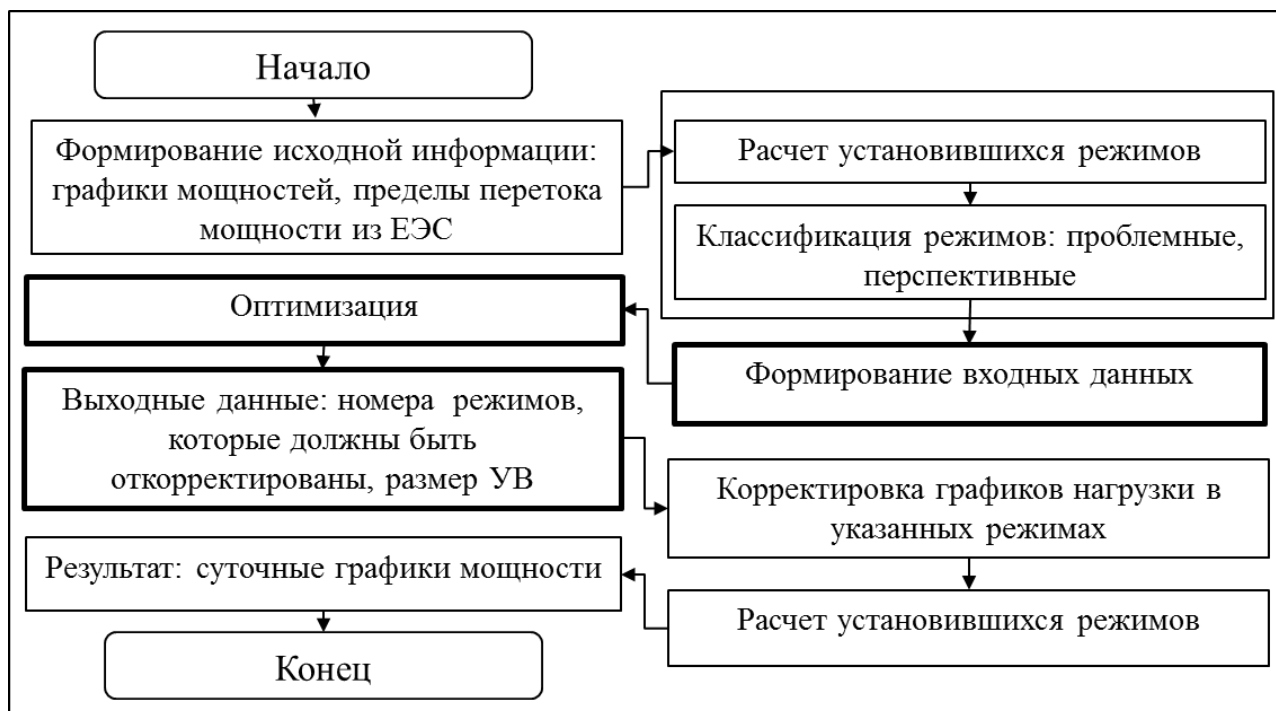


Рис. 1. Схема структуры входных и выходных данных задачи оптимизации
 Fig. 1. Diagram of the input and output data structure of the optimization problem

солнечной станций, верхний $P_{\text{ЕЭС}}^{\text{max}}$ и нижний $P_{\text{ЕЭС}}^{\text{min}}$ пределы разрешенного значения перетока активной мощности из ЕЭС.

Для каждой точки плановых графиков нагрузок (всего h) вычисляется установившийся режим и анализируется условие:

$$P_{\text{ЕЭС}}^{\text{min}} < P_{\text{ЕЭС}} < P_{\text{ЕЭС}}^{\text{max}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ЕЭС}}$ – переток мощности из ЕЭС.

При нарушении верхней границы условия (1) происходит отключение АЭК от ЕЭС и этот режим называется проблемным режимом. Для предотвращения отключения необходимо разгрузить АП в данное время. Нарушение нижней границы условия (1) интерпретируется как наличие возможности увеличить переток, что позволяет дополнительно загрузить АП. Такой режим называется перспективным. Режимы, не попадающие под вышеуказанные характеристики, далее не рассматриваются. Таким образом, все исследуемые режимы классифицируются на проблемные (h_1) и перспективные (h_2). Из параметров этих режимов формируются входные данные для задачи оптимизации. В работе рассматривается несколько способов формирования входных данных.

Выходные данные – время, когда необходимо изменить нагрузку (номер режима)

и величина этой нагрузки для каждого АП (управляющие воздействия) – используются в следующем порядке: сначала корректируются нагрузки в проблемных и перспективных режимах; затем для каждой точки графика измененных нагрузок рассчитывается УР. В результате получают откорректированные суточные графики нагрузок, форма которых имеет более гладкий вид по сравнению с плановыми графиками.

В зависимости от способа задания входных данных для задачи оптимизации получаются разные выходные данные, а, следовательно, и различные суточные графики нагрузок и перетока из ЕЭС. В работе выполняется исследование зависимости результатов оптимизации распределения отложенной мощности от способа задания входных данных с целью формирования графиков мощности, следуя которым обеспечивается оптимальное управление АЭК при минимальном (нулевом) сокращении потребляемой мощности и при минимальном (нулевом) количестве отключений АЭК от внешней сети.

КРИТЕРИЙ ОПТИМАЛЬНОСТИ

Оптимальное распределение отложенной мощности определяется в результате решения оптимизационной задачи K раз, где K – ко-

личество вариантов задания входных данных.

Критерий оптимальности записывается следующим образом:

$$\varphi_{P(k)} - \varphi_{P(k-1)} < \zeta; \quad (2)$$

$$\varphi_{p(k)} = \sum_j^{h3} P_{\text{ЕЭС}(j)(k)}, \quad (3)$$

где $h3$ – количество проблемных режимов после корректировки графиков нагрузки; k – номер варианта задания входных данных; j – номер проблемного режима; $P_{\text{ЕЭС}(j)(k)}$ – переток активной мощности из сети в режиме j после корректировки, Мвт; ζ – заданная величина. $h3 = 0$ означает, что АЭК не отключается от ЕЭС в течение рассматриваемых суток.

Дефицит мощности ($\Delta P_{\text{АЭК}(k)}$), который остается в АЭК после корректировки графиков нагрузок, вычисляется по формуле:

$$\Delta P_{\text{АЭК}(k)} = \sum_j^{h3} (P_{\text{ЕЭС}(j)(k)}^{\text{к}} - P_{\text{ЕЭС}(j)}^{\text{max}}). \quad (4)$$

ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА

Укрупненная блок-схема разработанного алгоритма представлена на рис. 2.

Алгоритм представлен двумя частями. Первая часть выполняется один раз для каждого суток, вторая часть выполняется в цикле K раз.

Часть 1.

Исходная информация. На базе плановых графиков мощностей во всех узлах рассчитывается множество УР и формируется массив размерностью $[n \times h]$, где n – количество параметров режима, h – количество точек в сутки. Пределы перетока задаются в соответствии с требованиями АЭК и ЕЭС.

Анализ УР. Предобработка созданного множества УР осуществляется по условию (1). В результате выявляются проблемные и перспективные режимы за исследуемые сутки.

Определение УВ. В каждом проблемном режиме (j) вычисляется величина нагрузки в узле i (ΔP_i^{YB}), на которую следует уменьшить плановую нагрузку по формуле:

$$\Delta P_i^{YB} = P_{\text{ЕЭС}} - P_{\text{ЕЭС}}^{\text{max}}. \quad (5)$$

При наличии нескольких (r) АП эту величину необходимо распределить между ними в

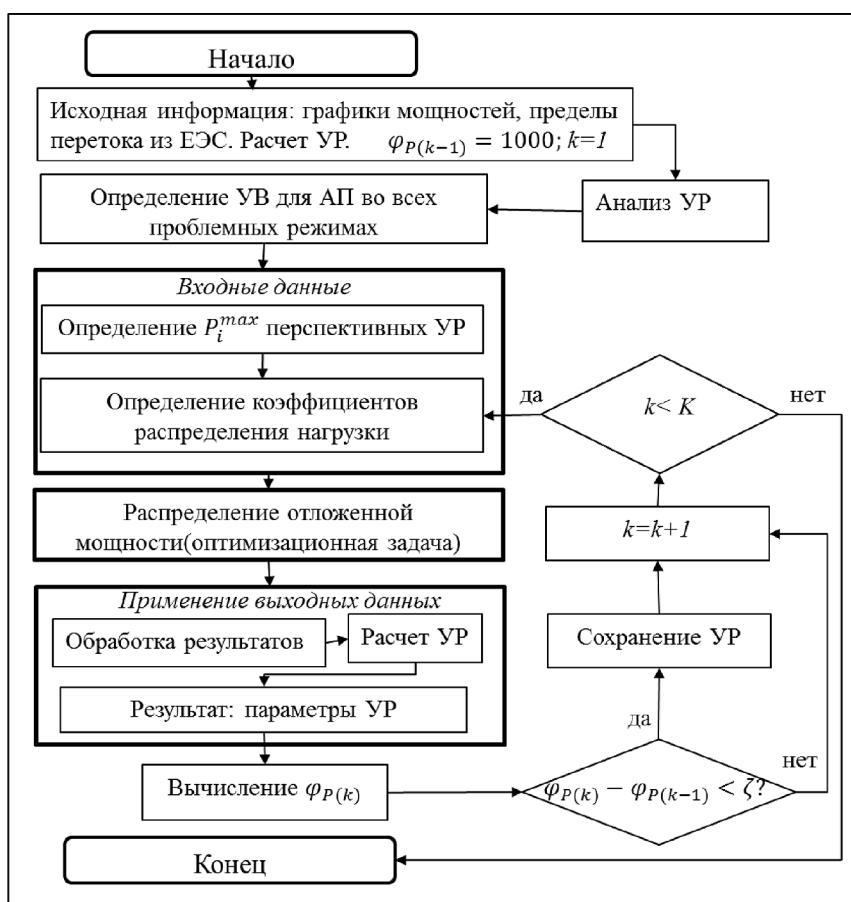


Рис. 2. Укрупненная блок-схема разработанного алгоритма
Fig. 2. Outline flowchart of the developed algorithm

соответствии с выбранными правилами. Один из путей решения этой задачи описан в [15].

Определение P_i^{max} перспективных УР. Определяется максимально возможная нагрузка во всех нагрузочных узлах в каждом перспективном режиме / по формуле:

$$P_{i(l)}^{max} = P_{i(l)}^{old} + m_i(P_{EЭС}^{min} - P_{EЭС}), \quad (6)$$

где P_i^{old} нагрузка i -го потребителя в плановом режиме, МВт; m_i – коэффициент распределения добавленной нагрузки.

Часть 2.

Определение коэффициентов распределения отложенной мощности. Для создания возможности более гибкого распределения отложенной мощности между перспективными режимам вводятся коэффициенты распределения отложенной мощности. Эти коэффициенты рассчитываются на основе информации о каждой конкретной нагрузке [16].

Задача распределения отложенной мощности формулируется как оптимизационная задача с ограничениями.

Обработка результатов – это применение полученных выходных данных для корректировки нагрузки в проблемных и перспективных режимах по формуле:

$$P_i^{new} = P_i^{old} + \alpha \Delta P_i, \quad (7)$$

где P_i^{new} – новое значение мощности в узле i в проблемном или перспективном режимах, МВт; P_i^{old} – старое значение мощности в узле i в проблемном или перспективном режимах, МВт; ΔP_i – результат оптимизации, МВт; $\alpha = 1$ в перспективном режиме, $\alpha = -1$ в проблемном режиме.

Расчет УР. Вычисляются параметры УР с новыми значениями нагрузок и с учетом ресурсов батареи. Балансирующим узлом назначается узел, который введен в расчетную схему для представления перетока из ЕЭС в виде инъекции.

Вычисление $\varphi_{P(k)}$. Показатель $\varphi_{P(k)}$ вычисляется по (3).

По окончании работы алгоритма (см. рис. 2) из K множеств откорректированных графиков нагрузок останется множество графиков, максимально удовлетворяющих всем требованиям.

РЕШЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

Проблема распределения отложенной мощности представляется оптимизационной

задачей множественного рюкзака [17] и формулируется следующим образом: есть N предметов и M рюкзаков ($M \leq N$). У каждого рюкзака своя вместимость W_i . Необходимо выбрать M непересекающихся множеств таким образом, чтобы суммарная стоимость каждого рюкзака была максимальной, а вес предметов в каждом рюкзаке не превышал его вместимость. Математически задача записывается следующим образом:

максимизировать

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p_i b_{ij} \rightarrow \max \quad (8)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^N w_i b_{ij} \leq W_i \text{ для всех } j = 1, 2, \dots, M; \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^M b_{ij} = 1 \text{ для всех } i = 1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

где $b_{ij} = 1$, если j -й предмет назначен i -му рюкзаку. Иначе, $b_{ij} = 0$. Входные данные – это вес предмета (weight), весовые коэффициенты (value), вместимость рюкзака (capacity).

В терминах задачи множественного рюкзака компоненты задачи распределения отложенной мощности интерпретируются следующим образом. N предметов – это $h1$ проблемных режимов, M рюкзаков – это $h2$ перспективных режимов. Необходимо распределить отложенную мощность между перспективными режимами таким образом, чтобы минимизировать количество проблемных режимов с минимальными затратами для АЭК.

Задача распределения отложенной мощности формулируется следующим образом:

Целевая функция:

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{h1} \sum_{l=1}^{h2} \sum_{v=1}^{h2} \Delta P_{i(j,l)} g_{i(j,l)v} C_{i(j,l)} b_{i(j,l)} \rightarrow \max \quad (11)$$

при ограничениях, записанных ниже (12)–(13) и при соблюдении законов Ома и Кирхгофа, где $\Delta P_{i(j,l)}$ – добавленное значение нагрузки в узле i (ΔP_i^{YB} , МВт) из проблемного режима j в перспективный режим l ; $C_{i(j,l)}$ – величина, обратная плате активному потребителю i за перенос нагрузки из режима j в режим l ; r – число активных потребителей; i – номер активного потребителя; $b_{i(j,l)}$ – параметр оптимизации; $b_{i(j,l)} = 1$ если нагрузка i -го узла в j -м режиме переносится на l -й режим, иначе $b_{i(j,l)} = 0$. $g_{i(j,l)v}$ показывает, какая часть отложенной мощности в режиме j переносится в режим l . $\sum_{v=1}^{h2} g_{i(j,l)v} = 1$. Коэффициент g отвечает за

распределение отложенной мощности между несколькими (или всеми) перспективными режимами. В том случае, когда нагрузка не может быть поделена на несколько частей, $g_i = 1$.

Ограничения записываются следующим образом.

Величина добавленной мощности в перспективном режиме

$$\sum_{j=1}^{h1} \Delta P_{i(j)} b_{i(j,l)} \leq P_{i(l)}^{max} \text{ для всех } l, i, \quad (12)$$

где $P_{i(l)}^{max}$ – максимальная величина мощности в узле i , в перспективном режиме (вычисляется по (6)).

Баланс активной мощности в узлах:

$$\Delta P_i = 0, \quad (13)$$

где ΔP_i – небаланс активной мощности (МВт) в узле i .

Для соблюдения условия, что одна и та же нагрузка не переносится больше одного раза, используется ограничение (10).

Входные данные – weight, value, capacity – формируются следующим образом.

Weight образуются из значений управляющих воздействий для каждого АП с учетом коэффициентов распределения. Размерность вектора равна $[1 \times ((\sum_i^r G_i) h1)]$, где G_i показывает на сколько частей может быть разбита i -я нагрузка. Каждое значение вектора вычисляется следующим образом:

$$\text{weight}_k = \Delta P_{i(j)} g_i$$

$$\text{для каждого } j = 1 \dots h1; i = 1 \dots h2, \quad (14)$$

где $\Delta P_{i(j)}$ – значение УВ (МВт) для i -й нагрузки для j -го режима; g_i – коэффициенты распределения для i -й нагрузки.

Value – весовые коэффициенты. Размерность вектора $[1 \times ((\sum_i^r G_i) h1))]$. Каждый элемент массива представляет собой цену сдвига мощности потребления с проблемного режима j в перспективный режим l .

Capacity – максимальная величина нагрузки АП в перспективном режиме – вычисляется по (6).

ВЫПОЛНЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанный алгоритм был применен для формирования суточного графика на-

грузки, расположенной на территории АЭК с целью минимизации отключений АЭК от ЕЭС. АЭК представлен 6-узловой схемой (рис. 3), где узлы 1 и 2 обозначают ветровую и солнечную станции соответственно, узлы 3 и 4 обозначают нагрузки, узел 5 – это батарея. Переток мощности из АЭК представлен инъекцией в узле 6. Для достижения поставленной цели корректировался график нагрузки в узле 3.

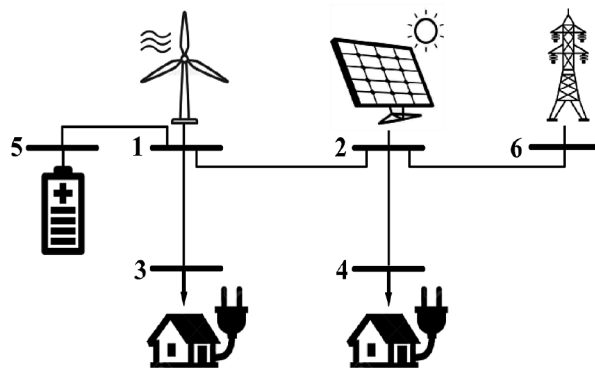


Рис. 3. Тестовая схема
Fig. 3. Test circuit

Исследование было выполнено в соответствии с алгоритмом, показанным на рис. 2, в следующем порядке.

1. Моделирование суточных плановых графиков мощностей. Моделирование графика мощности ветрового генератора (узел 3) было выполнено на базе данных о типовой кривой ветровой турбины и вероятности скорости ветра, полученной по закону Вейбула при $a = 8,9$, $b = 6,5$, где a – коэффициент формы; b – коэффициент неравномерности [18, 19]. График мощности солнечной станции моделировался в соответствии с⁴ [20].

2. Расчет установившихся режимов.

3. Анализ полученных режимов по условию (15) для определения проблемных и перспективных режимов:

$$3,5 < P_{ЕЭС} < 4,5. \quad (15)$$

Результат: проблемные режимы 12, 14, 16, 17, 18, 21, 22; перспективные режимы 3, 4, 5, 6, 15.

4. Задание входных данных. $P_{(l)}^{max}$ вычисляется по (6), где $l = 3, 4, 5, 6, 15$; $m_3 = 1$.

⁴Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электро-станциями: учеб. пособие. Томск: ТПУ, 2015. 128 с.

Результаты экспериментов
 Experimental results

№ строки	Параметр	Значение параметра					
1	№ эксперимента	1	2	3	4	5	6
2	Количество частей	0	2	3	5	8	10
3	Количество режимов	3	2	1	1	1	1
4	$\Delta P_{\text{АЭК}}(k)$	1,6182	0,665	0,1510	0,1510	0,1510	0,1510
5	φ_P	15,1181	9,665	4,652	4,652	4,652	4,652

В рамках исследования было выполнено 6 экспериментов, которые отличались друг от друга коэффициентами распределения отложенной мощности. В эксперименте 1 нагрузка полностью переносилась из проблемного режима в перспективный. В экспериментах 2–6 нагрузка делилась на 2, 3, 5, 8, 10 частей соответственно (таблица, строка 2).

5. Решение оптимизационной задачи.

6. Корректировка графиков нагрузки по (7).

7. Расчет УР.

Результаты расчета УР сведены в таблицу и показаны на рис. 4–6. В первой и во второй строках таблицы представлены номера экспериментов и количество частей, на которые делится нагрузка в каждом эксперименте соответственно. В третьей строке показано количество режимов за сутки, когда произойдет отключение АЭК от ЕЭС. В четвертой строке представлена величина превышения максимально разрешенного перетока из ЕЭС. В пятой строке дана величина дефицита мощности, который возникнет из-за отключения линии. Из таблицы видно, что лучшим является

результат при делении нагрузки на 3 и более частей.

На рис. 4 а – 6 а показаны исходные графики мощностей (см. легенду, кривые 7–11) во всех узлах АЭК и графики мощности, полученные в результате расчета УР по откорректированным графикам нагрузки, а также верхний предел передаваемой мощности. На рис. 4 б – 6 б представлены графики заряда батареи для экспериментов 1, 2 и 3 соответственно. Из рис. 4 а видно, что три режима остались проблемными, и при отключении линии дефицит мощности составит 15,1181 МВт. Рис. 5 а демонстрирует 2 проблемных режима и дефицит мощности 9,665 МВт. Рис. 6 а демонстрирует 1 проблемный режим и дефицит мощности 4,652 МВт.

Анализ всех рисунков показывает, что при корректировке нагрузки в заданных условиях появляется проблемный режим 7, в котором происходит превышение порога на 0,151 МВт. Эту нагрузку невозможно перенести на другое время и покрыть за счет батареи (рис. 4 б, 5 б, 6 б).

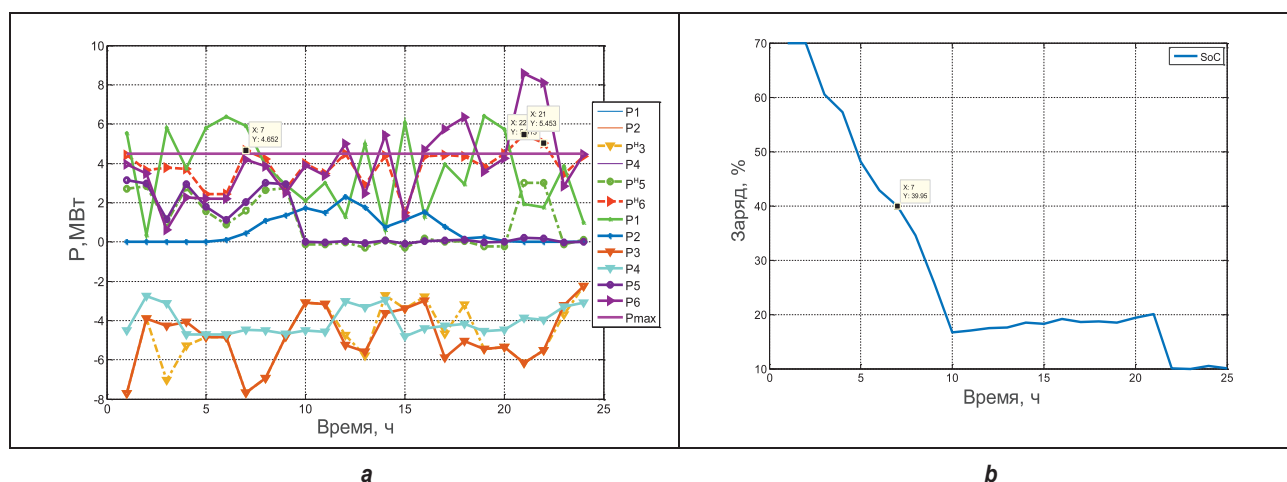
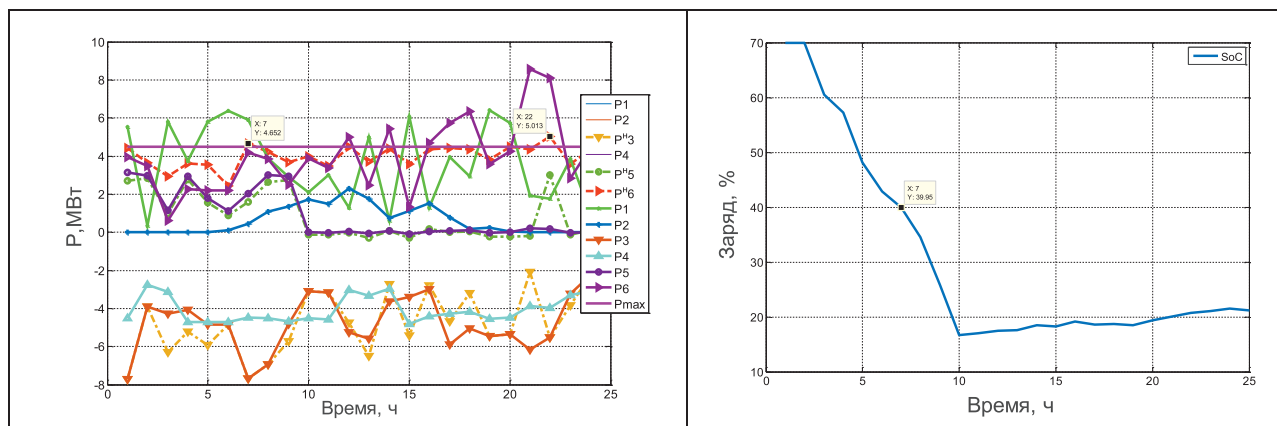


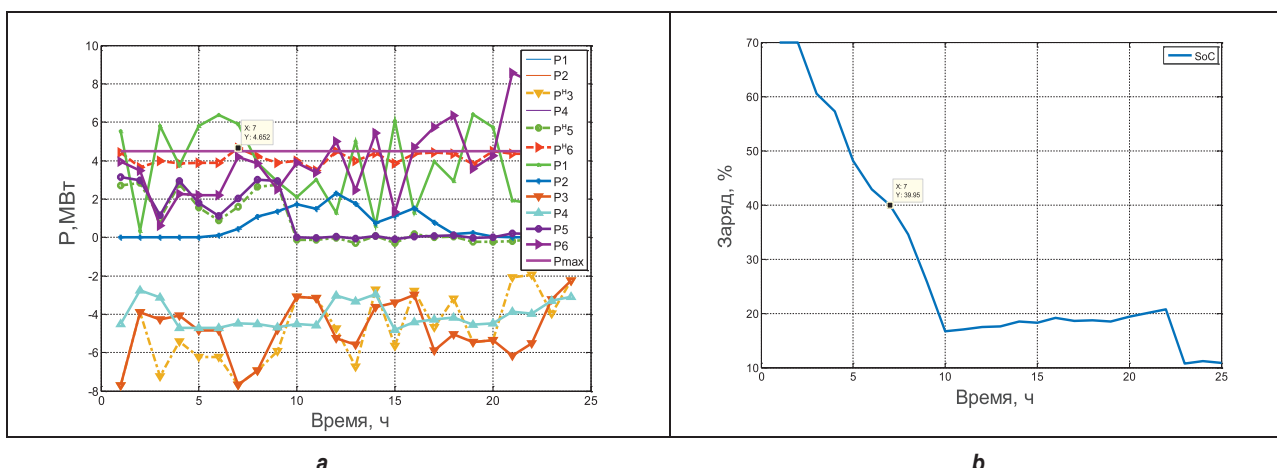
Рис. 4. Результаты. Эксперимент 1: а – плановые и откорректированные графики мощностей; б – заряд батареи

Fig. 4. Results. Experiment 1: а – planned and adjusted power curves; б – battery charge level



а **б**
 Рис. 5. Результаты. Эксперимент 2: а – плановые и откорректированные
 графики мощностей; б – заряд батареи

Fig. 5. Results. Experiment 2: a – planned and adjusted power curves; b – battery charge level



а **б**
 Рис. 6. Результаты. Эксперимент 3: а – плановые и откорректированные
 графики мощностей; б – заряд батареи

Fig. 6. Results. Experiment 3: a – planned and adjusted power curves; b – battery charge level

В этом случае, чтобы избежать отключения линии от ЕЭС, следствием которого будет дефицит мощности 4,652 МВт, необходимо отключить нагрузку равную 0,151 МВт в режиме 7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описана задача формирования суточных графиков нагрузок активных потребителей, расположенных на территории экологически дружелюбного АЭК. Графики нагрузок формируются в результате корректировки плановых суточных графиков, которая выполняется в случае нарушения пределов, заданных для перетока мощности из ЕЭС.

Разработан алгоритм формирования суточных графиков нагрузок. Алгоритм объединяет решение следующих задач: анализ плановых графиков мощностей, вычисление управляющих воздействий, оптимальное рас-

пределение отложенной мощности, расчет установившихся режимов.

Сформированы целевая функция и ограничения для решения проблемы оптимального распределения отложенной мощности. Указанная проблема представляется оптимизационной задачей множественного рюкзака. Выполнена интерпретация входных и выходных данных задачи множественного рюкзака для ее адаптации к решению проблемы оптимального распределения отложенной мощности.

Представлено понятие коэффициента распределения отложенной мощности. Данные коэффициенты отвечают за распределение отложенной мощности в рассматриваемом проблемном режиме между несколькими перспективными режимами путем введения этих коэффициентов в целевую функцию.

Выполнено формирование суточных графиков нагрузок, входящих в состав тестовой АЭК, по разработанному алгоритму. Проведены эксперименты по оценке полученных графиков с точки зрения обеспечения бесперебойности в электроснабжении потребителей АЭК в зависимости от коэффициентов распределения отложенной мощности. Ана-

лиз полученных результатов показал, что полное исключение нарушения в электроснабжении потребителей АЭК достигается при наличии возможности разделить нагрузку для переноса ее на другие часы суток и при отключении 0,151 МВт в режиме 7. Нагрузка должна быть разделена не менее чем на три части.

Список источников

1. Рогалев Н.Д., Молодюк В.В., Исамухамедов Я.Ш. Активный энергетический комплекс: повышенные требования обеспечения надежности // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы 90-го заседания Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко (г. Иркутск, 1–7 июля 2018 г.). Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 2018. Т. 1-69. С. 9–17. EDN: IPRDCP.
2. Дацко К.А. Активные энергокомплексы // Энергетическая политика. 2020. № 6. С. 64–75. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_6148_64. EDN: KEVGJS.
3. Chen Chen, Wang Jianhui, Kishore S. A distributed direct load control approach for large-scale residential demand response // IEEE Transactions on Power Systems. 2014. Vol. 29. Iss. 5. P. 2219–2228. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2307474>.
4. Mollah K., Nair N.K.C., Rayudu R.K. Demand response an alternative solution to prevent load shedding triggering // EAI Endorsed Transactions on Energy Web. 2014. Vol. 1. Iss. 3. P. e2. <https://doi.org/10.4108/ew.1.3.e2>.
5. Conejo A.J., Morales J.M., Baringo L. Real-time demand response model // IEEE Transactions on Smart Grid. 2010. Vol. 1. Iss. 3. P. 236–242. <https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2078843>.
6. Gils H.C. Assessment of the theoretical demand response potential in Europe // Energy. 2014. Vol. 67. P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.019>.
7. Silva B.N., Khan M., Han K. Futuristic sustainable energy management in smart environments: a review of peak load shaving and demand response strategies, challenges, and opportunities // Sustainability. 2020. Vol. 12. Iss. 14. P. 5561. <https://doi.org/10.3390/su12145561>.
8. Meyabadi A.F., Deihimi M.H. A review of demand-side management: reconsidering theoretical framework // Renewable and Sustainable Energy. 2017. Vol. 80. P. 367–379. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.207>.
9. Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Соколов Д.В., Шелехова В.Б. Активное участие потребителя в управлении своим энергоснабжением // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 11-12. С. 88–100. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-11-12-88-100>. EDN: YTZTWX.
10. Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Коротков И.Ю. Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт // Энергетическая политика. 2020. Т. 6. № 148. С. 76–86. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_6148_76. EDN: YBOUHF.
11. Kalkhambkar V., Kumar R., Bhakar R. Energy loss minimization through peak shaving using energy storage // Perspectives in Science. 2016. Vol. 8. P. 162–165. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.022>.
12. Gutiérrez-Oliva D., Colmenar-Santos A., Rosales-Asensio E. A review of the state of the art of industrial microgrids based on renewable energy // Electronics. 2022. Vol. 11. Iss. 7. P. 1002. <https://doi.org/10.3390/electronics11071002>.
13. Feng Wei, Jin Ming, Liu Xu, Bao Yi, Marnay Chris, Yao Cheng, Yu Jiancheng. A review of microgrid development in the United States – a decade of progress on policies, demonstrations, controls, and software tools // Energy. 2018. Vol. 228. P. 1656–1668. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.096>.
14. Hassan M.A.S., Chen Minyou, Li Qiang, Mehmood M.A., Cheng Tingli, Li Bo. Microgrid control and protection state of the art: a comprehensive overview // Journal of Electrical Systems. 2018. Vol. 14. Iss. 2. P. 148–164.
15. Glazunova A. Development of a day-ahead demand side management strategy to improve the microgrid efficiency // 11th Symposium on Control of Power and Energy Systems IFAC CPES. 2022. Vol. 55. Iss. 9. P. 256–261. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.045>.
16. Аксаева Е., Глазунова А. Создание планировщика для реализации технологии смещения нагрузки в программе управления спросом // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Надежность систем энергетики в условиях современных вызовов и угроз / отв. ред. акад. РАН В.А. Стенников. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2023. Вып. 74. С. 652–662.
17. Kellerer H., Pferschy U., Pisinger D. Knapsack problems. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. 548 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-24777-7>.
18. Lun I.Y.F., Lam J.C. A study of Weibull parameters using long-term wind observations // Renewable Energy. 2000. Vol. 20. Iss. 2. P. 145–153. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00103-2](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00103-2).
19. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б., Муравлев А.И. Энергоэффективные управляемые генераторы для ветроэлектростанций // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312. № 4. С. 128–130. EDN: JRGNSL.
20. Zhu Lan, Yan Zheng, Lee Wei-Jen, Yang Xiu, Fu Yang, Cao Wei. Direct load control in microgrids to enhance the performance of integrated resources planning // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015. Vol. 51. No. 5. P. 3553–3560. <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2413960>.

References

1. Rogalev N.D., Molodyuk V.V., Isamuhamedov Ya.Sh. Active energy complex: step up requirements for reliability. In: *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki: materialy 90-go zasedaniya Mezhdunarodnogo nauchnogo seminara imeni Yu.N. Rudenko* = Methodological issues in studying large energy systems reliability: materials of the 90th meeting of the International Scientific Seminar named after Yu.N. Rudenko. 1–7 July 2018, Irkutsk. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; 2018, vol. 1-69, p. 9-17. (In Russ.). EDN: IPRDCP.
2. Datsko K.A. Active energy complexes. *Energeticheskaya politika*. 2020;6:64-75. (In Russ.). https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_6148_64. EDN: KEVGJS.
3. Chen Chen, Wang Jianhui, Kishore S. A distributed direct load control approach for large-scale residential demand response. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2014;29(5):2219-2228. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2307474>.
4. Mollah K., Nair N.K.C., Rayudu R.K. Demand response an alternative solution to prevent load shedding triggering. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*. 2014;1(3):e2. <https://doi.org/10.4108/ew.1.3.e2>.
5. Conejo A.J., Morales J.M., Baringo L. Real-time demand response model. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2010;1(3):236-242. <https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2078843>.
6. Gils H.C. Assessment of the theoretical demand response potential in Europe. *Energy*. 2014;67:1-18. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.019>.
7. Silva B.N., Khan M., Han K. Futuristic sustainable energy management in smart environments: a review of peak load shaving and demand response strategies, challenges, and opportunities. *Sustainability*. 2020;12(14):5561. <https://doi.org/10.3390/su12145561>.
8. Meyabadi A.F., Deihimi M.H. A review of demand-side management: reconsidering theoretical framework. *Renewable and Sustainable Energy*. 2017;80:367-379. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.207>.
9. Stennikov V.A., Barahtenko E.A., Sokolov D.V., Shelekhova V.B. Active demand-side management. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2017;19(11-12):88-100. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-11-12-88-100>. EDN: YTZTWX.
10. Zyryanov V.M., Kir'yanova N.G., Korotkov I.Yu. Energy storage systems: Russian and international experience. *Energeticheskaya politika = Energy Policy*. 2020;6(148):76-86. (In Russ.). https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_6148_76. EDN: YBOUHF.
11. Kalkhambkar V., Kumar R., Bhakar R. Energy loss minimization through peak shaving using energy storage. *Perspectives in Science*. 2016;8:162-165. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.022>.
12. Gutiérrez-Oliva D., Colmenar-Santos A., Rosales-Asensio E. A review of the state of the art of industrial microgrids based on renewable energy. *Electronics*. 2022;11(7):1002. <https://doi.org/10.3390/electronics11071002>.
13. Feng Wei, Jin Ming, Liu Xu, Bao Yi, Marnay Chris, Yao Cheng, Yu Jiancheng. A review of microgrid development in the United States – a decade of progress on policies, demonstrations, controls, and software tools. *Energy*. 2018;228:1656-1668. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.096>.
14. Hassan M.A.S., Chen Minyou, Li Qiang, Mehmood M.A., Cheng Tingli, Li Bo. Microgrid control and protection state of the art: a comprehensive overview. *Journal of Electrical Systems*. 2018;14(2):148-164.
15. Glazunova A. Development of a day-ahead demand side management strategy to improve the microgrid efficiency. In: *11th Symposium on Control of Power and Energy Systems IFAC CPES*. 2022;55(9):256-261. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.045>.
16. Aksaeva E., Glazunova A. Creation of a scheduler for load shifting technology implementation in a demand management program. In: Stennikova V.A. (eds.). *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki. Nadezhnost' sistem energetiki v usloviyah sovremennykh vyzovov i ugroz = Methodological issues in studying large energy systems reliability. Energy system reliability in the context of modern challenges and threats*. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; 2023, Iss. 74, p. 652-662. (In Russ.).
17. Kellerer H., Pferschy U., Pisinger D. *Knapsack problems*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2004, 548 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-24777-7>.
18. Lun I.Y.F., Lam J.C. A study of Weibull parameters using long-term wind observations. *Renewable Energy*. 2000;20(2):145-153. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00103-2](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00103-2).
19. Lukutin B.V., Shandarova E.B., Muravlev A.I. Energy-efficient controlled generators for wind power plants. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2008;312(4):128-130. (In Russ.). EDN: JRGNSL.
20. Zhu Lan, Yan Zheng, Lee Wei-Jen, Yang Xiu, Fu Yang, Cao Wei. Direct load control in microgrids to enhance the performance of integrated resources planning. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015;51(5):3553-3560. <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2413960>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Глазунова Анна Михайловна,
д.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
✉ glazunova@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7288-6168>

Съемщиков Сергей Евгеньевич,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры «Техносферная безопасность»,
Иркутский государственный университет путей
сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
semshikovsergei@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anna M. Glazunova,
Dr. 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
✉ glazunova@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7288-6168>

Sergei E. Sieemshchikov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Technosphere
Safety,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia
semshikovsergei@gmail.com

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.11.2023 г.; одобрена после рецензирования 25.11.2023 г.; принята к публикации 30.11.2023 г.

Information about the article

The article was submitted 06.11.2023; approved after reviewing 25.11.2023; accepted for publication 30.11.2023.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 62-589.1

EDN: GHONPU

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-84-94



Алгоритмы двухзонного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами

А.Е. Давыдов^{1✉}, Б.М. Боченков², Ю.В. Панкрац³¹⁻³Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Резюме. Целью исследования являлось расширение диапазона (с сохранением мощностных характеристик) скорости синхронного двигателя с постоянными магнитами в электроприводе главного движения металлорежущего станка. В работе использовалось математическое моделирование электропривода синхронного двигателя с постоянными магнитами с помощью программного продукта SimInTech. В качестве исходных данных для моделирования использовались параметры двигателя постоянного тока: номинальная мощность 2,2 кВт, напряжение 315 В, скорость 1500 об/мин, КПД 90,5%, номинальный ток 6 А. Разработан алгоритм управления электроприводом, включающий две зоны управления: зону максимальной мощности и зону увеличенной скорости. Показано, что в зоне максимальной мощности поддерживаются номинальные характеристики, а в зоне увеличенной скорости достигается повышение скорости синхронного двигателя в электроприводе главного движения металлорежущего станка до 2 раз без ухудшения мощностных характеристик. Проведены численные эксперименты и сравнительный анализ результатов работы алгоритма управления с традиционными методами управления, которые подтвердили теоретические значения. Результаты моделирования показали, что при управлении синхронных двигателей с постоянными магнитами во второй зоне энергопотребление системы управления не превышает номинальных значений. Таким образом, разработанная система управления синхронных двигателей с постоянными магнитами обеспечивает эффективное управление электроприводом главного движения металлорежущего станка, демонстрирующего улучшенные характеристики обработки материалов, изготавливаемых из металлов с малой твердостью. Проведенное авторами исследование представляет практическую значимость для промышленности, где повышение скорости двигателя в металлорежущих станках является важным фактором для увеличения производительности и снижения времени обработки.

Ключевые слова: металлорежущие станки, синхронный двигатель с постоянными магнитами, математическое моделирование, преобразователь частоты, двухзонное управление

Для цитирования: Давыдов А.Е., Боченков Б.М., Панкрац Ю.В. Алгоритмы двухзонного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 84–94. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-84-94>. EDN: GHONPU

POWER ENGINEERING

Original article

Algorithms for dual-zone control of a permanent-magnet synchronous motor

Artem E. Davydov^{1✉}, Boris M. Bochenkov², Yuriy V. Pankrats³¹⁻³Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract. The article is aimed at extending the speed range of a permanent-magnet synchronous motor in the main-motion electric drive of a machine tool (while maintaining the power characteristics). In this work, the electric drive of a permanent-magnet synchronous motor was mathematically modeled using the SimInTech software. As input data for modeling, the following DC motor parameters were used: nominal power of 2.2 kW, voltage of 315 V, speed of 1500 rpm, energy conversion efficiency of 90.5%, and nominal current of 6 A. An algorithm for controlling the electric drive was developed to include two control zones: zone of maximum power and increased speed zone. It is shown that in the maximum power zone, the nominal characteristics are maintained, while in the increased speed zone, an increase in motor speed of up to two times is achieved in the main-motion electric drive of the machine tool without a decrease in its power characteristics. Numerical experiments were conducted, as well as an analysis comparing the control algorithm and

© Давыдов А.Е., Боченков Б.М., Панкрац Ю.В., 2024

conventional control methods, which confirmed the theoretical values. The modeling results showed that with the control of permanent-magnet synchronous motors, the power consumption of a control system in the second zone does not exceed the nominal values. Thus, the developed system for controlling permanent-magnet synchronous motors provides effective control over the main-motion electric drive of a machining tool that demonstrates improved performance in machining materials made of low-hardness metals. The present study is of practical importance for industries in which increasing motor speed in machine tools constitutes an important factor in improving capacity and reducing machining time.

Keywords: metal-cutting machines, permanent magnet synchronous motor, mathematical modeling, frequency converter, two-zone control

For citation: Davydov A.E., Bochenkov B.M., Pankrats Yu.V. Algorithms for dual-zone control of a permanent-magnet synchronous motor. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):84-94. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-84-94>. EDN: GHONPU

ВВЕДЕНИЕ

Интеграция синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) в электроприводы металлорежущих станков с ЧПУ имеет существенное влияние на их развитие. СДПМ обеспечивает высокую плотность мощности, что позволяет станкам обрабатывать металлические заготовки с высокой точностью. Точное управление и обратная связь от СДПМ дают возможность станкам выполнять операции, такие как фрезерование и сверление, с повторяемостью и минимальными отклонениями. Электронная регулировка СДПМ также улучшает скорость и плавность движения инструмента, способствуя повышению производительности и общей эффективности производства металлических изделий [1, 2].

Тем не менее повышение эффективности обработки возможно путем увеличения скорости вращения ротора шпинделя. Но прямое увеличение оборотов приведет к необходимости увеличения энергопотребления двигателя, что, в свою очередь, может вызвать повреждение электропривода, а также негативно сказаться на заготовке или шпинделе из-за возможного перегрева [3].

Решением данной задачи может стать увеличение скорости путем ослабления потока, в таком случае мощность, прилагаемая к фрезе, остается неизменной, вследствие этого фреза проходит одну и ту же точку большее количество раз, в результате чего качество обрабатываемой поверхности увеличивается.

Ранее начало исследования было представлено на конференции [4], в данной статье представлено продолжение, в котором раскрыто более подробное изложение методологии и точнее результаты, полученные в ходе работы.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования, целью которых является расширение диапазона скорости СДПМ, привлека-

ют широкий интерес исследователей в свете их потенциальной важности для достижения требуемых характеристик без необходимости дополнительных финансовых вложений в области электропривода. В приведенном примере [5] выполняется исследование, в ходе которого авторы осуществляют сравнение и анализ механических, регулировочных и энергетических характеристик электроприводов на основе двигателя постоянного тока (ДПТ) с электроприводом на основе вентильного двигателя (ВД). В ходе данного сопоставительного анализа было выявлено, что электропривод на основе ВД демонстрирует значительные преимущества по сравнению с электроприводом на основе ДПТ в связи с уникальными конструктивными особенностями и наличием усовершенствованных систем управления. Отсутствие щеток в конструкции и возможность более глубокой настройки при взаимодействии с частотным преобразователем обеспечивают электроприводу с ВД выдающиеся регулировочные и энергетические характеристики в широком спектре угловых скоростей. Кроме того, данное исследование указало на перспективность внедрения вентильных двигателей в системы электропривода металлорежущих станков.

Однако в исследовании, проведенном авторами работы [6], сравниваются электроприводы, использующие асинхронный двигатель (АД), ВД и СДПМ. Результаты данного научного изыскания показали, что СДПМ является наиболее эффективным типом двигателя, характеризующимся низким уровнем пульсаций, по сравнению с ВД, а также обеспечивающим более плавное и точное управление. Эти особенности СДПМ могут привести к лучшей производительности при применении в металлорежущих станках.

В работах [2, 4] рассматривается перспектива уменьшения магнитного потока СДПМ. Это потенциально позволяет увеличить ско-

рость вращения двигателя без необходимости внесения дополнительных изменений в его конструкцию. А в статье [7] авторы исследуют лучшую структуру расположения магнитов в СДПМ, подходящую для ослабления потока.

В статье [3] осуществлен расчет сил и момента резания, возникающих в процессе фрезерования с использованием концевых фрез. Автором сделан вывод о необходимости учета множества параметров, таких как глубина резания, скорость подачи, степень износа режущего инструмента, а также влияние ширины фрезерования и диаметра фрезы на силы резания и крутящий момент. Особое внимание было уделено условиям экспериментов, при которых можно достичь достаточной равномерности процесса фрезерования для получения надежных результатов. Эти результаты подчеркивают важность учета множества факторов при проектировании экспериментов и оптимизации процесса фрезерования с использованием концевых фрез, что может привести к более точному контролю и повышению эффективности данного производственного процесса.

В контексте внедрения технологии ослабления потока СДПМ во фрезерные станки, исследования и разработки в этой области представляют собой важное направление. Понимание влияния магнитного потока на результирующие характеристики момента и скорости и оптимизация конструкции СДПМ способствуют повышению производительности и эффективности фрезерных станков. Данные исследования могут привести к созданию более точных и эффективных систем фрезерования, что, в свою очередь, может значительно улучшить качество обработки поверхностей и снизить износ режущих инструментов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка системы управления. Для реализации второй зоны управления требуется ослабить потокосцепление двигателя, в результате чего уменьшится максимальный момент (M , н/м), а угловая скорость (ω , рад/с) станет выше. При этом мощность (P , кВт) остается на уровне не менее номинальной. График этого перехода показан на рис. 1. На графике показан переход от зоны, где преобладает максимальный момент (первая зона), к зоне, где момент снижается, а скорость увеличивается (вторая зона), при этом мощность двигателя не снижается.

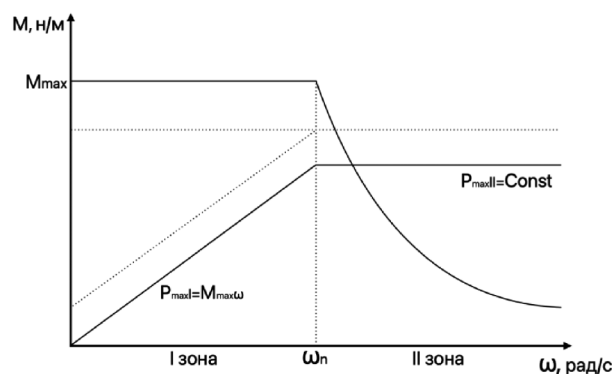


Рис. 1. Схема перехода синхронных двигателей постоянного тока во вторую зону управления
Fig. 1. Diagram of synchronous direct current motor transition to the second control zone

Устройство электропривода главного движения металлорежущего станка показано на рис. 2 и имеет общепринятую структуру. Это контроллер управления, с которого на инвертор подаются сигналы широтно-импульсной модуляции (ШИМ), и подключается источник постоянного напряжения, а с инвертора подается трехфазное напряжение ABC на СДПМ, с которого методом измерения датчиками тока и скорости формируется обратная связь.

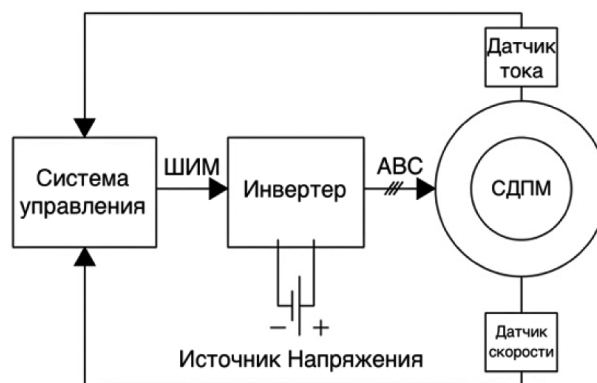


Рис. 2. Структурная схема электропривода
Fig. 2. Structural diagram of the electric drive

В качестве системы координат была выбрана система dq и построена структурная схема электропривода, которая показана на рис. 3. На блок-схеме присутствует: РС – регулятор скорости, РЭ – регулятор ЭДС, БР – блок расчета ЭДС, РТ – регулятор тока, КП – координатный преобразователь, I_q – ток по оси q, I_{d3} – задающее значение тока по оси d, ω – обратная связь по скорости, ω_3 – задающее значение скорости, E_3 – задающее значение ЭДС.

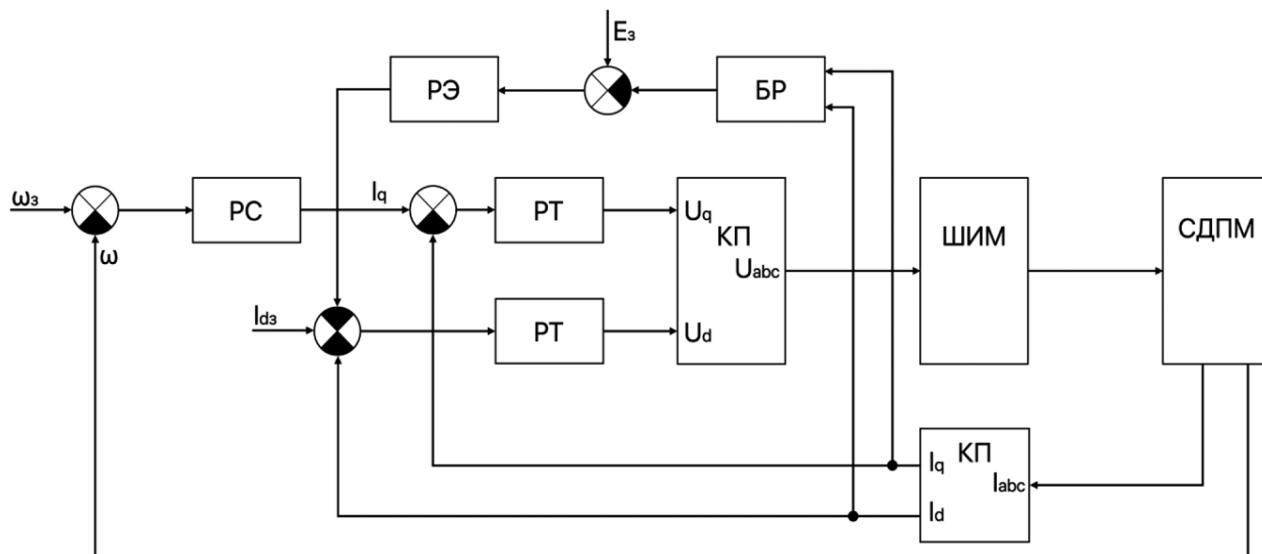


Рис. 3. Блок-схема dq системы управления синхронных двигателей постоянного тока
 Fig. 3. Block diagram of the dq control system of synchronous direct current motors

Для перехода во вторую зону управления требуется ослабить магнитный поток, с этой целью в схеме был добавлен регулятор электродвижущей силы (ЭДС).

Детали диаграммы на рис. 3 следуют в порядке слева направо: настройка желаемой скорости двигателя, обратная связь по скорости, регулирование скорости, обратные связи по току q и d, регуляторы тока в координатах dq, координатный преобразователь dq в ABC, блок преобразования ШИМ. СДПМ, координатный преобразователь ABC в dq и итоговая скорость [8, 9]. Регулятор ЭДС подключается в обратную связь по току Id, входными данными которого является расчетная ЭДС относительно номинальной и включается только при переходе во вторую зону управления.

Математическое описание системы. СДПМ описывается формулами:

$$\begin{cases} pI_{sd} = \frac{1}{L_{sd}}(U_{sd} - R_s I_{sd} + \omega_e L_{sq} I_{sq}) \\ pI_{sq} = \frac{1}{L_{sq}}(U_{sq} - R_s I_{sq} + \omega_e L_{sd} I_{sd} - \psi_f \omega_e) \\ M_{em} = \frac{3Z_p}{2}(I_{sq} \psi_f + I_{sd} I_{sq}(L_{sd} - L_{sq})) \end{cases} \quad (1)$$

ПИ-регулятор тока рассчитывается по формуле:

$$U_d = k_p e + k_i \int e dt, \quad (2)$$

где k_p – расчетное пропорциональное звено;
 k_i – расчетное интегральное звено.

Формула производной замкнутой системы для звена k_p :

$$k_p = \frac{k_1 \cdot \frac{L}{r}}{(a_1 \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{U}{U_n})}, \quad (3)$$

где k_1 – обратная связь по току, А; a_1 – выбранный коэффициент.

Формула производной замкнутой системы для звена k_i :

$$k_i = \frac{k_1}{(a_1 \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{U}{U_n})}. \quad (4)$$

Пропорционально-дифференциальный (ПД) регулятор скорости рассчитывается по формуле:

$$U_d = k_p e + k_d \frac{de}{dt}. \quad (5)$$

Формула производной замкнутой системы для звена k_p :

$$k_p = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot J}{(a_2 \cdot W_m)}, \quad (6)$$

где k_2 – обратная связь по скорости, рад/с; a_2 – выбранный коэффициент.

Формула производной замкнутой системы для звена k_d :

$$k_d = \frac{a_1 \cdot k_2 \cdot J}{(a_2 \cdot W_m \cdot k_1)}. \quad (7)$$

Функция передачи I/U для машины:

$$W_i = W_{ci} \cdot k \cdot W_{co}, \quad (8)$$

где W_{ci} – передаточная функция регулятора тока; k – коэффициент преобразователя; W_{oce} – передаточная функция объекта управления.

Передаточная функция формирования момента на валу машины одинакова для схемы q и d и имеет вид:

$$W_m = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \Psi \cdot \frac{1}{J \cdot s}, \quad (9)$$

где Z_p – количество пар полюсов; Ψ – потокосцепление ротора машины, Вб; J – момент инерции двигателя, н/м.

Передаточная функция контура скорости для тока q на рис. 2 показана ниже:

$$W_s = W_{sc} \cdot W_i \cdot W_m, \quad (10)$$

где W_s – передаточная функция контура скорости; W_{cs} – передаточная функция регулятора скорости; W_i – передаточная функция токового контура; W_m – передаточная функция крутящего момента двигателя.

Передаточная функция контура скорости для тока d на рис. 3 отличается наличием регулятора потокосцепления:

$$W_s = W_{sc} \cdot W_\psi \cdot W_m, \quad (11)$$

где W_ψ – передаточная функция контура потокосцепления.

Передаточная функция цепи потокосцепления для тока d показана на рис. 3, где $W_{c\psi}$ – передаточная функция регулятора потокосцепления;

L_d – индуктивность статора по петле тока d , Гн.

Для ослабления потокосцепления в классическую двухконтурную систему полеориентированного управления вводится блок регулирования потокосцепления (R_ψ) [10, 11].

Для ослабления магнитного потока в классической двухконтурной системе управления, основанной на ориентации поля, вводится блок регулирования потока магнитного потока (R_ψ). По математическому описанию была составлена блок-схема системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами, в координатах dq представлена на рис. 3 [1, 2, 4, 12–14].

Из математического описания системы мы получаем диаграммы, иллюстрируемые на рис. 4, 5.

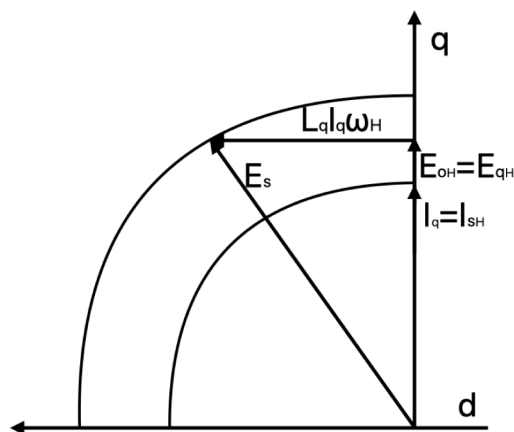


Рис. 4. Диаграмма работы синхронных двигателей постоянного тока в первой зоне
Fig. 4. Diagram of synchronous direct current motor operation in the first zone

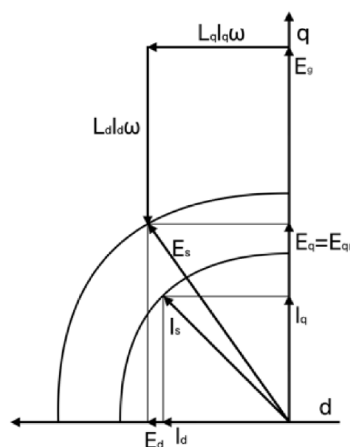


Рис. 5. Схема синхронных двигателей постоянного тока с ослабленным потоком
Fig. 5. Diagram of synchronous direct current motors with the weakened flux

На рис. 4 представлена диаграмма, иллюстрирующая работу СДПМ в номинальном режиме. На этой диаграмме показан режим работы с поперечным током ротора равным номинальному току ($I_s = I_{sH} = I_q$), А, при номинальной частоте вращения. Модуль вектора ЭДС (E_s) достигает предельного значения, ограниченного окружностью $r = E_{sH}$. Также на диаграмме присутствуют следующие векторы и параметры:

E_q – ЭДС по оси q , В;

$L_q I_q \omega$ – ЭДС реакции ротора по оси q , В.

На рис. 5 показана диаграмма при $\omega > \omega_H$. Вектор E_s остается неизменным, в то время как вектор общей ЭДС (E_g) увеличивается и превышает E_{sH} . Это происходит в связи с введением тока по оси d (I_d) при таком уменьшении тока I_q , что $L_q I_q \omega = \text{const} = L_q I_{sH} \omega_H$, это приводит к появлению ЭДС реакции ротора по оси d ($L_d I_d \omega$), ко-

торая компенсирует увеличение E_g так, что E_q остается неизменной. Также на диаграмме присутствуют следующие векторы и параметры:

E_{qr} – номинальная ЭДС по оси q , В;

E_d – ЭДС по оси d , В;

I_s – модуль тока, А.

Введение зависимости I_d от I_q и ω важно для достижения оптимальной производительности и эффективности работы СДПМ в различных режимах.

$$I_d = \frac{E_q - E_g}{L_d \cdot \omega \cdot p_{in}} = \frac{\sqrt{E_{sr}^2 - (L_q i_q \omega p_{in})^2} - C \Phi_f \omega p_{in}}{L_d \cdot \omega \cdot p_{in}}. \quad (12)$$

Данный алгоритм позволяет при ограниченной ЭДС вращения достигать более высоких скоростей вращения ротора. Это позволит при тех же значениях тока I_d создать дополнительное магнитное поле, направленное против постоянных магнитов, что позволит ослабить результирующее поле и расширить диапазон регулирования скорости с постоянством мощности.

Математическая модель, представленная в данном контексте, направлена на оценку возможности управления двигателем, используемым в механизме привода главного движения металлорежущего станка во второй зоне. Анализ второй зоны является критически важным, поскольку регулирование потокосцепления двигателя оказывает влияние на косинус фазового угла ($\cos\phi$), что позволяет при сохранении общей мощности двигателя повысить скорость вращения ротора при уменьшении критического момента электродвигателя. В результате этого металлорежущий станок, оснащенный данной системой управления, имеет более высокие характеристики обработки, такие как точность и качество обработки деталей, особенно тех, которые изготавливаются из мягких металлов. Это означает, что система управления

способствует улучшению производительности и точности обработки материалов на станке [8, 10–18].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для моделирования использовались параметры двигателя, указанные в таблице, все расчеты проводились в среде математического моделирования SimInTech. Модели СДПМ, ПИ-регуляторов разработаны и верифицированы разработчиками программного обеспечения.

Характеристики синхронных двигателей постоянного тока

Characteristics of synchronous direct current motors

№	Наименование	Значение
1	Количество пар полюсов	4
2	Номинальная мощность	2200 Вт
3	Напряжение	360 В
4	Номинальная скорость	1500 об/мин
5	Номинальная частота	50 Гц
6	КПД	90,5%
7	Номинальный ток	6 А
8	Номинальный момент	14 Нм
9	Максимальный момент (2 мин)	45 Нм
10	Коэффициент мощности	0,99η
11	Фазное сопротивление	2,1 Ом

В данной математической модели выполнен расчет на увеличение частоты вращения ротора в 1,5 раза.

На рис. 6 демонстрируется графическое представление скорости двигателя, иллюстрируя следующие этапы: инициирование пуска двигателя, рабочий режим на стандартной скорости, переход к повышенной скорости и установившийся режим на высокой скорости. Для разгона двигателя до номинальных оборотов требуется 0,1 с, а с момента начала переключения на повышенные обороты до достижения устойчивого состояния повышенных оборотов проходит 0,25 с.

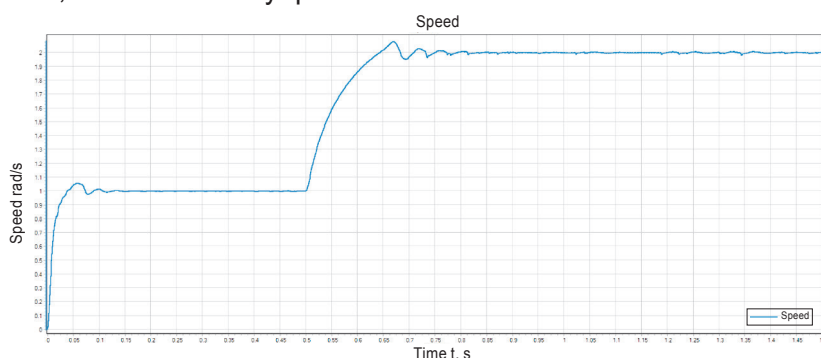


Рис. 6. График скорости, рад/с
 Fig. 6. Speed graph, rad/s

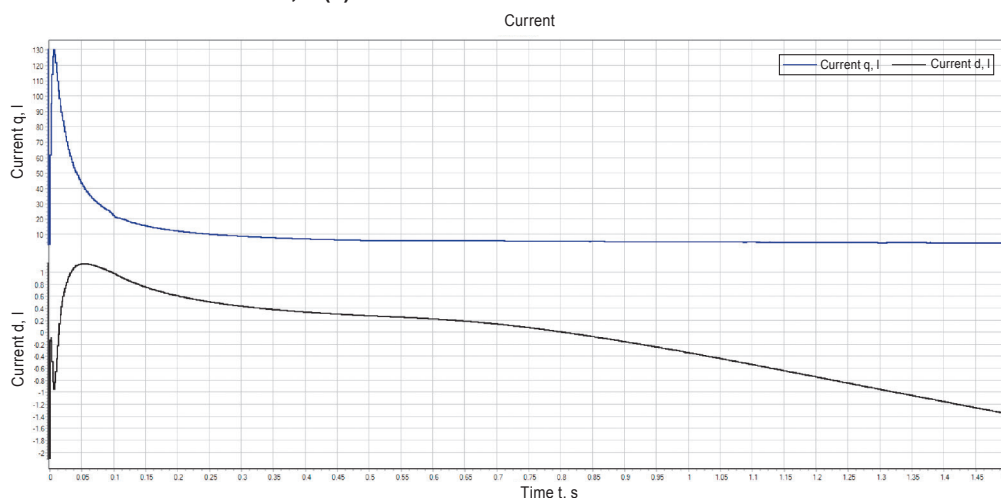


Рис. 7. График тока, I, A

Fig. 7. Current graph, I, A

Рис. 7 представляет собой график тока в системе координат dq. Из графика видно, что ток в номинальном режиме стремится к нулю в связи с моментом сопротивления равным 1 Н/м, а при переходе на повышенную скорость ток по оси d возрастает, что приводит к ослаблению магнитного поля статора. Стоит отметить, что суммарный ток двигателя не превышает номинального тока двигателя. Исходя из полученных данных видно, что на повышенной скорости двигатель потребляет мощности не больше, чем в номинальном режиме, и достигается это за счет изменения потокосцепления.

Для увеличения скорости вращения за счет увеличения мощности требуется подать больший ток на двигатель. На рис. 8 представлен график тока при переходе во вторую зону за счет увеличения мощности двигателя.

Из рис. 8 видно, что усредненное значение тока при увеличении скорости увеличивается в 7–8 раз, что в условиях номинальных нагрузок может быть равным 32–36 А, при номинальном значении тока в 4,5 А. При кратковременном изменении такое превышение тока не приведет к отрицательным последствиям для двигателя, однако энергозатраты значительно превышают те, что будут необходимы при предложенном двухзонном управлении.

В данной статье проведено исследование перспективного двухзонного алгоритма управления электроприводом синхронных двигателей с постоянными магнитами в электроприводе главного движения металлорежущего станка. В ходе исследования было проведено математическое моделирование электропривода с СДПМ, в результате которого были получены следующие результаты: при ослаблении потокосцепления двигатель может раз-

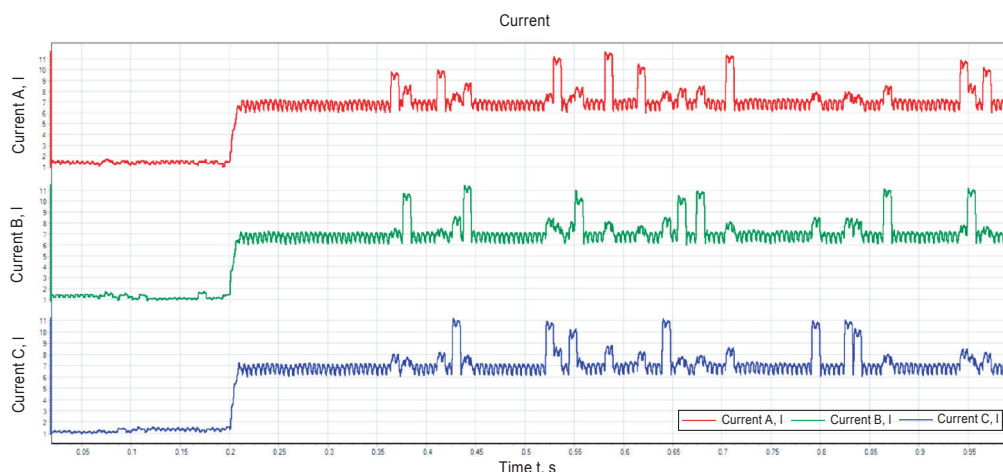


Рис. 8. Текущий график, I, A, в системе координат abc

Fig. 8. Current graph, I, A, in abc coordinate system

вивать скорость в 2 раза выше номинальной, со снижением максимального момента, что не влияет на мощность электропривода. Это способствует улучшению качества обработки металлов. Однако стоит отметить, что предложенный алгоритм может работать в узком диапазоне повышения скорости, например в случае обработки твердых металлов. Тем не менее это позволяет повысить качество обработки поверхности и увеличить надежность конструкции станка, поскольку потребляемый ток остается в номинальных значениях, обеспечивая нормальную работу всех элементов цепи. Следует также учесть, что разгон электродвигателя более, чем два раза, может привести к саморазрушению, если не будет проведена модернизация механической части. В связи с высокой стоимостью СДПМ было решено предварительно провести математическое моделирование системы управления, и при успешных результатах перейти к стендовым испытаниям. В представленной математической модели все модели идеальны, поэтому реальные результаты могут отличаться. В будущих статьях планируется представить результаты стендового моделирования на реальных СДПМ для сравнения с результатами моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система управления СДПМ является ключевым элементом электропривода главного движения металлорежущего станка. Для управления двигателем СДПМ было выполнено математическое моделирование, позволившее оценить его работу на номинальных и повышенных оборотах. Результаты моделирования показали, что при управлении СДПМ во второй зоне скоростей энергопотребление системы управления не превышает номинальных значений. Таким образом, разработанная система управления СДПМ обеспечивает эффективное управление электроприводом главного движения металлорежущего станка, что, в свою очередь, обеспечивает их надежную и безопасную работу. В итоге металлорежущий станок, оборудованный данной системой управления, демонстрирует улучшенные характеристики обработки материалов. Особенно это касается точности и качества обработки деталей, в основном изготавливаемых из металлов, обладающих невысокой твердостью (мягких). Это означает, что система управления способствует повышению производительности и уровня точности в процессе обработки материалов на станке.

Список источников

1. Фираго Б.И. Работа трехфазных вентильных двигателей переменного тока при скорости выше основной // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2011. № 4. С. 12–16. EDN: QNRKFD.
2. Коваль А.С., Яшин В.С., Артеменко А.И. Модель электропривода на базе СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе и регулированием потока // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2019. № 3(64). С. 121–128. http://doi.org/10.53078/20778481_2019_3_121. EDN: AGLUAI.
3. Грубый С.В. Расчет сил и момента резания при фрезеровании концевыми фрезами // *Известия вузов. Машиностроение*. 2020. № 10. С. 26–37. <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-10-26-37>. EDN: ASBBMG.
4. Davydov A., Pankrats Yu., Ivanov I., Bayanov E., Chipurnov S. Analysis of the application of traction engines in unmanned aerial vehicles // *Электротехнические комплексы и системы: материалы I Всероссийской конференции по электрическим машинам в рамках Международной научно-практической конференции* (г. Уфа, 26–28 октября 2022 г.). Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2022. Р. 235–243. EDN: СКҮКСТ.
5. Щагин А.В., Нгуен Тхань Зьюн, Чжо Сое Вин. Сравнительный анализ электроприводов производственных станков // *Известия вузов. Электроника*. 2022. Т. 27. № 2. С. 193–204. <http://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-2-193-204>. EDN: BZZGAV.
6. Rauth S.S., Samanta B. Comparative analysis of IM/BLDC/PMSM drives for electric vehicle traction applications using ANN-Based FOC // *IEEE 17th India Council International Conference*. 2020. Vol. 17. <http://doi.org/10.1109/INDICON49873.2020.9342237>.
7. Li Chunyan, Kou Baoquan. Research on a permanent magnet synchronous motor with parted permanent magnet used for spindle // *16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology*. 2012. <http://doi.org/10.1109/EML.2012.6325049>.
8. Davydov A., Bochenkov B., Anosov V. Compact inverter for single-phase induction motor // *International Russian Automation Conference (Sochi, 5-11 September 2021)*. Sochi: IEEE, 2021. P. 74–78. <http://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537331>.
9. Yu Yang, Cong Leyao, Tian Xia, Mi Zengqiang, Li Yang, Fan Zhen, et al. A stator current vector orientation based multi-objective integrative suppressions of flexible load vibration and torque ripple for PMSM considering electrical loss // *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*. 2020. Vol. 4. Iss. 3. P. 161–171. <http://doi.org/10.30941/CESTEMS.2020.00021>.

10. Carpaneto M., Marchesoni M., Vallini G. Practical implementation of a sensorless field oriented PMSM drive with output AC filter // SPEEDAM (Pisa, 14–16 June 2010). Pisa: IEEE, 2010. P. 318–323. <http://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2010.5545088>.
11. Kolano K. New method of vector control in PMSM motors // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 43882–43890. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3272273>.
12. Kotin D., Davydov A., Pankrats Yu., Ivanov I. Dual-zone control of the traction permanent magnet synchronous motor in the unmanned aerial vehicle // International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration. 2023. Vol. 10. No. 105. P. 1093–1102. <http://doi.org/10.19101/IJATEE.2022.10100564>.
13. Zhang Yunfei, Qi Rong, Rong Qi. Flux-weakening drive for IPMSM based on model predictive control // Energies. 2022. Vol. 15. No. 7. P. 2543. <http://doi.org/10.3390/en15072543>.
14. Chau Kwok Tong, Chan Ching Chuen, Liu Chunhua. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55. Iss. 6. P. 2246–2257. <http://doi.org/10.1109/TIE.2008.918403>.
15. Lee Sung Gu, Bae Jaenam, Kim Won-Ho. A study on the maximum flux linkage and the goodness factor for the spoke-type PMSM // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2018. Vol. 28. No. 3. P. 5200705. <http://doi.org/10.1109/TASC.2017.2775561>.
16. Xu X., Novotny D.W. Selection of the flux reference for induction machine drives in the field weakening region // IEEE Transactions on Industry Applications. 1992. Vol. 28. Iss. 6. P. 1353–1358. <http://doi.org/10.1109/28.175288>.
17. Joshi D., Deb D., Muyeen S.M. Comprehensive review on electric propulsion system of unmanned aerial vehicles // Frontiers in Energy Research. 2022. Vol. 10. P. 752012. <http://doi.org/10.3389/fenrg.2022.752012>.
18. Коваль А.С., Шваяков А.В. Электромеханическая система лифтов со скоростью до 2 м/с // Вестник Белорусско-Российского университета. 2009. № 4. С. 113–120. EDN: OITKCL.
19. Киселев Н.В., Мядзель В.Н., Рассудов Л.Н. Электроприводы с распределенными параметрами. Л.: Судостроение, 1985. 220 с.
20. Коваль А.С., Артеменко А.И. К вопросу разработки электропривода пассажирских лифтов с регулируемой номинальной скоростью движения кабины лифта // Вестник Белорусско-Российского университета. 2018. № 4(61). С. 56–61. http://doi.org/10.53078/20778481_2018_4_56. EDN: YPLUUP.

References

1. Firago B.I. Operation of three-phase brushless AC motors at speeds higher than the main one. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*. 2011;4:12-16. (In Russ.). EDN: QNRKFD.
2. Koval A.S., Yashin V.S., Artemenko A.I. Model of a PMSM-based electric drive with surface arrangement of magnets on the rotor and flow regulation. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*. 2019;3:121-128. (In Russ.). http://doi.org/10.53078/20778481_2019_3_121. EDN: AGLUAI.
3. Grubiy S.V. Calculation of the cutting forces and torque when milling with end mills. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2020;10:26-37. (In Russ.). <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-10-26-37>. EDN: ASBBMG.
4. Davydov A., Pankrats Yu., Ivanov I., Bayanov E., Chipurnov S. Analysis of the application of traction engines in unmanned aerial vehicles. In: *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy: materialy I Vserossijskoj konferencii po elektricheskim mashinam v ramkah Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Electrical complexes and systems: materials of the 1st All-Russian Conference on Electrical Machines within the framework of the International scientific and practical conference*. 26–28 October 2022, Ufa. Ufa: Ufa University of Science and Technology; 2022, p. 235-243. (In Russ.). EDN: CKYKCT.
5. Shchagin A.V., Nguyen Thanh Duong, Kyaw Soe Win. Comparative analysis of electric drives of processing equipment. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*. 2022;27(2):193-204. (In Russ.). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-2-193-204>. EDN: BZZGAV.
6. Rauth S.S., Samanta B. Comparative analysis of IM/BLDC/PMSM drives for electric vehicle traction applications using ANN-Based FOC. In: *IEEE 17th India Council International Conference*. 2020;17. <http://doi.org/10.1109/INDICON49873.2020.9342237>.
7. Li Chunyan, Kou Baoquan. Research on a permanent magnet synchronous motor with parted permanent magnet used for spindle. In: *16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology*. 2012. <http://doi.org/10.1109/EML.2012.6325049>.
8. Davydov A., Bochenkov B., Anosov V. Compact inverter for single-phase induction motor. In: *International Russian Automation Conference*. 5-11 September 2021, Sochi. Sochi: IEEE; 2021, p. 74-78. <http://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537331>.
9. Yu Yang, Cong Leyao, Tian Xia, Mi Zengqiang, Li Yang, Fan Zhen, et al. A stator current vector orientation based multi-objective integrative suppressions of flexible load vibration and torque ripple for PMSM considering electrical loss. In: *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*. 2020;4(3):161-171. <http://doi.org/10.30941/CESTEMS.2020.00021>.
10. Carpaneto M., Marchesoni M., Vallini G. Practical implementation of a sensorless field oriented PMSM drive with output AC filter. In: *SPEEDAM*. 14–16 June 2010, Pisa. Pisa: IEEE; 2010, p. 318-323. <http://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2010.5545088>.
11. Kolano K. New method of vector control in PMSM motors. *IEEE Access*. 2023;11:43882-43890. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3272273>.

12. Kotin D., Davydov A., Pankrats Yu., Ivanov I. Dual-zone control of the traction permanent magnet synchronous motor in the unmanned aerial vehicle. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. 2023;10(105):1093-1102. <http://doi.org/10.19101/IJATEE.2022.10100564>.
13. Zhang Yunfei, Qi Rong, Rong Qi. Flux-weakening drive for IPMSM based on model predictive control. *Energies*. 2022;15(7):2543. <http://doi.org/10.3390/en15072543>.
14. Chau Kwok Tong, Chan Ching Chuen, Liu Chunhua. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008;55(6):2246–2257. <http://doi.org/10.1109/TIE.2008.918403>.
15. Lee Sung Gu, Bae Jaenam, Kim Won-Ho. A study on the maximum flux linkage and the goodness factor for the spoke-type PMSM. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018;28(3):5200705. <http://doi.org/10.1109/TASC.2017.2775561>.
16. Xu X., Novotny D.W. Selection of the flux reference for induction machine drives in the field weakening region. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1992;28(6):1353-1358. <http://doi.org/10.1109/28.175288>.
17. Joshi D., Deb D., Muyeen S.M. Comprehensive review on electric propulsion system of unmanned aerial vehicles. *Frontiers in Energy Research*. 2022;10:752012. <http://doi.org/10.3389/fenrg.2022.752012>.
18. Koval A.S., Shvayakov A.V. Electromechanical system of lifts with a speed of 2 m/s. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*. 2009;4:113-120. (In Russ.). EDN: OITKCL.
19. Kiselev N.V., Myadzel' V.N., Rassudov L.N. *Electric drives with distributed parameters*. Leningrad: Sudostroenie; 1985, 220 p. (In Russ.).
20. Koval A.S., Artemenko A.I. On the selection of speed controller parameters and the formation of motion tachograms in elevator adjustable drives. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*. 2018;4:56-61. (In Russ.). http://doi.org/10.53078/20778481_2018_4_56.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Давыдов Артем Евгеньевич,
аспирант,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Россия
✉ a.e.davydov@corp.nstu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1912-9747>

Artem E. Davydov,
Postgraduate Student,
Novosibirsk State Technical University,
20 Karl Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia
✉ a.e.davydov@corp.nstu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1912-9747>

Боченков Борис Михайлович,
к.т.н., доцент,
кафедра электропривода и автоматизации
промышленных установок,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Россия
bochenkov@ngs.ru
<https://orcid.org/0009-0003-2382-9954>

Boris M. Bochenkov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Department of Electric Drive and Automation of Industrial
Installations,
Novosibirsk State Technical University,
20 Karl Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia
bochenkov@ngs.ru
<https://orcid.org/0009-0003-2382-9954>

Панкрац Юрий Витальевич,
к.т.н., доцент,
кафедра электропривода и автоматизации
промышленных установок,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Россия
pankrats79@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3879-3029>

Yuriy V. Pankrats,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Department of Electric Drive and Automation of Industrial
Installations,
Novosibirsk State Technical University,
20 Karl Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia
pankrats79@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3879-3029>

Вклад авторов

Contribution of the authors

Давыдов А.Е. – концептуализация, исследование, сбор данных, первоначальный вариант написания рукописи, редактирование. Боченков Б.М. – концепция исследования, дизайн. Панкрац Ю.В. – концепция исследования, сбор данных.

Davydov A.E. carried out conceptualization, performed the research, collected data, submitted the original manuscript and was responsible for editing. Bochenkov B.M. was responsible for the research concept and design. Pankrats Yu.V. was responsible for the research concept and data collection.

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 16.11.2023 г.; одобрена после рецензирования 30.11.2023 г.; принята к публикации 05.12.2023 г.

Information about the article

The article was submitted 16.11.2023; approved after reviewing 30.11.2023; accepted for publication 05.12.2023.

ЭНЕРГЕТИКА

Обзорная статья

УДК 621.311

EDN: TQEHZH

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-95-110



Обзор методов реализации виртуальной инерции в условиях работы энергосистем с ветровыми и солнечными электростанциями

А.Р. Идрисов¹, А.А. Ачитаев²✉

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

²Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета, г. Саяногорск,
рп. Черёмушки, Россия

Резюме. Цель – провести обзор литературных источников, посвященных методам реализации виртуальной инерции ветровых и солнечных электростанций, с помощью которых возможно увеличение качества их управления. Изучено около 50 научных статей и обзоров, подобранных в различных научных источниках (в том числе IEEE, Web of Science и Scopus) по следующим ключевым словам: «ветроустановка», «ветроэлектрическая станция», «виртуальная инерция», «микросеть», «системы накопления энергии», «суперконденсатор», «регулирование частоты». Применен метод систематизированного обзора специализированных источников, который дает возможность обеспечить четко определенную структуру для данной области исследований путем категоризации статей. Проведен анализ работ, посвященных снижению негативного влияния возобновляемых источников энергии на энергосистему. Показано, что развитие технологий, позволяющих повысить регулировочные способности электростанции на основе возобновляющих источников энергии, является актуальной задачей, так как их низкая инерция приводит к снижению устойчивости энергосистем. Из анализа литературных источников следует, что одним из решений повышения устойчивости таких энергосистем является создание виртуальной инерции ветроэнергетических установок и солнечных панелей. Однако ввиду ограниченной мощности отдельных генерирующих установок эффективность внедрения виртуальной инерции может быть недостаточной при ее независимой реализации на отдельных агрегатах. В связи с этим показано, что многообещающим решением может стать создание виртуальной инерции на основе гибридной системы, состоящей из суперконденсатора и генерирующей установки, управляемой на основе метода виртуального синхронного генератора. В данном обзоре выполнен анализ специализированных источников по вопросу методов реализации виртуальной инерции в условиях работы энергосистем с ветровыми и солнечными электростанциями. Сделан вывод о том, что на сегодняшний день исследования предлагаемого подхода не проводились либо не представлены, а описанные в обзоре тезисы можно подтвердить, разработав необходимые алгоритмы и проведя анализ результатов.

Ключевые слова: изолированная энергосистема, ветрогенераторы, искусственная инерция, система накопления энергии, динамическая устойчивость

Для цитирования: Идрисов А.Р., Ачитаев А.А. Обзор методов реализации виртуальной инерции в условиях работы энергосистем с ветровыми и солнечными электростанциями // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 95–110. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-95-110>. EDN: TQEHZH.

POWER ENGINEERING

Review article

Overview of methods for implementing virtual inertia in energy systems with wind and solar power plants

Azat R. Idrisov¹, Andrey A. Achitaev²✉

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

²Siberian Federal University, Sayano-Shushensky branch, Cheremushki settlement, Russia

Abstract. The article aims to review the literature on methods for implementing virtual inertia of wind and solar power plants, which can be used to improve control over them. About 50 scientific articles and reviews selected from

various scientific sources (including IEEE, Web of Science, and Scopus) using the following keywords were examined: wind turbine, wind farm, virtual inertia, microgrid, energy storage systems, supercapacitor, and frequency control. The method of systematic review of specialized sources was applied to provide a well-defined structure for a given field of study through article categorization. Works devoted to reducing the negative impact of renewable energy sources on the energy system were analyzed. The article shows the relevance of developing technologies that enable an improvement in the control capabilities of a power plant using renewable energy sources since their low inertia leads to a decrease in the stability of energy systems. The literature analysis indicates that one of the solutions to increase the stability of such energy systems involves creating virtual inertia in wind turbines and solar panels. However, due to the limited capacity of individual generating units, the effectiveness of implementing virtual inertia may not be sufficient when it is implemented independently in individual units. In this connection, it can be promising to create virtual inertia using a hybrid system comprising a supercapacitor and a generating unit controlled via the virtual synchronous generator method. This review analyzes specialized sources on the methods for implementing virtual inertia in energy systems with wind and solar power plants. It is concluded that no studies of the proposed approach have been conducted or presented to date, and the ideas described in the overview can be confirmed by developing the required algorithms and analyzing the results.

Keywords: isolated power system, wind turbines, artificial inertia, energy storage system, dynamic stability

For citation: Idrisov A.R., Achitayev A.A. Overview of methods for implementing virtual inertia in energy systems with wind and solar power plants. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):95-110. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-95-110>. EDN: TQENZH.

ВВЕДЕНИЕ

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) становятся более актуальными в силу ряда факторов, таких как необходимость сокращения выбросов парниковых газов, смягчение последствий изменения климата, сохранение природных ресурсов и обеспечение энергетической безопасности. В этом контексте ВИЭ приобретают ключевое значение, предоставляя уникальные возможности для генерации электроэнергии с минимальным воздействием на окружающую среду. Стремительное развитие технологий ветровой, солнечной и других форм ВИЭ открывает новые перспективы для создания более устойчивой и чистой энергетической инфраструктуры.

Эксплуатация и управление в современных энергосистемах сталкиваются с новыми проблемами, возникающими из-за растущей интеграции ВИЭ с управлением с помощью силовых преобразователей. Основные проблемы динамических характеристик и устойчивости в современной энергосистеме вызваны снижением инерции в энергосистеме, поскольку ВИЭ, подключенные к системе через силовые преобразователи, постепенно заменяют синхронные генераторы (СГ). Уменьшение инерции вращения в энергосистеме отрицательно влияет на характеристики энергосистемы и ухудшает возможности ее управления. Это может привести к значительным колебаниям частоты сети, напряжения и даже потере стабильности системы. Снижение инерции энергосистемы из-за высокого проникновения ВИЭ делает регулирование мощности и частоты чрезвычайно сложной

задачей. Прерывистость производства возобновляемой энергии значительно усугубляет данную проблему. Это условие более критично в изолированных энергосистемах с небольшим количеством генераторов и низкой кинетической энергией.

Эмуляция желательной динамики, такой как инерция и правильное формирование подаваемой мощности от управляемых источников энергии через силовые преобразователи, является многообещающим решением. Регулирование мощности, обеспечиваемое ВИЭ через силовые преобразователи, может поддерживать устойчивость сети к различным возмущениям и уменьшать колебания мощности и возмущения параметров. Благодаря быстрому реагированию эта дополнительная регулирующая сила оказывает эффективное воздействие за короткий период времени.

Таким образом, актуальность использования ВИЭ сложно переоценить. ВИЭ обеспечивают многочисленные экономические, социальные и экологические преимущества, что делает их устойчивым решением для удовлетворения наших энергетических потребностей. Разработка и использование возобновляемых источников энергии могут стимулировать инновации и создавать новые растущие отрасли. Переход к возобновляемым источникам энергии открывает новые возможности в области «зеленых» технологий. Эти инновации могут способствовать устойчивому и экологически безопасному экономическому росту.

Однако применение ВИЭ также вносит негативный вклад в работу энергосистем. А именно – повышается сложность регулиро-

вания частоты энергосистемы. Поддержка частоты энергосистемы является одним из ключевых аспектов обеспечения устойчивой работы энергосистемы. Ветровые и солнечные электростанции могут вносить нестабильность в работу сети, так как их первичный источник энергии является непостоянным и изменчивым по своей природе. Однако с использованием технологии поддержки частоты ВИЭ могут вместе с тем стать полезным инструментом в системах энергоснабжения.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В силу активного развития использования возобновляемой энергии в энергосистемах возникает вопрос о необходимости создания алгоритмов управления силовых преобразователей с целью регулирования частоты энергосистемы. Цель работы – провести обзор литературных источников, посвященных методам реализации виртуальной инерции ветровых и солнечных электростанций, с помощью которых возможно увеличение качества их управления. Данная статья направлена на изучение тенденций применения технологии виртуальной инерции, позволяющей генерации на основе ВИЭ принимать участие в регулировании частоты.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материалов исследования были проанализированы публикации, подобранные в различных научных источниках (в том числе IEEE, Web of Science и Scopus) по следующим ключевым словам: «ветроустановка», «ветроэлектрическая станция», «виртуальная инерция», «микросеть», «системы накопления энергии», «суперконденсатор», «регулирование частоты». Часть этих публикаций приведена в списке литературы. Влияние малой инерции на работу энергосистем с распределенной генерацией (РГ) и связанные с этим проблемы описываются в [1, 2]. Чтобы расширить возможности системы для интеграции с возобновляемыми источниками энергии, которые имеют низкую инерцию, возрастают требования к надежности работы энергосистем с целью увеличения их устойчивости к скорости изменения частоты ROCOF (от англ. Rate of Change of Frequency) [3]. Другим способом повышения устойчивости системы является определение ограничений минимального уровня инерции в задаче оптимиза-

ции мощности [4]. Однако последнее решение уменьшает часть выработки возобновляемых ресурсов для поддержания работы традиционных электростанций.

Другим подходом к улучшению инерционности РГ является введение виртуальной инерции, в которой используются возможности силовой электроники, характеристики генерации и накопителей энергии. Этот подход был ранее предложен в работе [5]. Преобразователь, имитирующий поведение синхронного генератора, называется синхронным преобразователем. Метод управления, имитирующий поведение синхронного генератора, называется управлением виртуальным синхронным генератором VSG (virtual synchronous generator). Реализация виртуальной инерции на основе уравнения качания синхронного генератора вместо полной детализированной модели рассматривается в исследовании [5].

Обзор методов повышения устойчивости работы возобновляемых источников энергии на основе виртуального синхронного генератора. Преобразователь ВИЭ, подключенный к РГ, может управляться для поддержки частотной динамики [6]. Эта цель может быть достигнута путем имитации управления регулятором обычных генерирующих станций, которое называется управлением статизмом, а также путем имитации инерционной реакции вращающейся машины, называемой управлением виртуальной инерцией VIC (от англ. Virtual Inertia Controller), или с помощью эмуляции уравнения движения синхронного генератора, которое называется виртуальным синхронным генератором (ВСГ). Эта концепция позволяет реализовать все функции, присущие традиционным источникам генерации в ЭЭС (электроэнергетических системах). Таким образом, достигается сопоставимый уровень надежности функционирования современных ЭЭС с энергообъектами на ВИЭ по сравнению с традиционными ЭЭС, где преобладают синхронные генерирующие объекты.

В работах [7, 8] представлены результаты обобщения и синтеза существующих концепций ВСГ в типовые структуры, отражающие их основные свойства и возможности. Проведен комплексный анализ функционирования этих структур при различных схемно-режимных ситуациях и возмущениях в ЭЭС, а также выполнено их экспериментальное сравнение.

На основе полученных результатов проанализированы преимущества и недостатки синтезированных структур ВСГ и сделан вывод о том, что замена традиционных систем управления преобразователями на одну из структур ВСГ, описанных в [7], повышает надежность функционирования ЭЭС.

Результаты моделирования, представленные в [9, 10], показывают, что изменение конфигурации структуры ВСГ и управляемых переменных может существенно повысить эффективность его функционирования при различных воздействиях, что приводит к улучшению регулирования частоты и напряжения. Структурная схема системы автоматического управления силовым преобразователем на основе виртуального синхронного генератора со свободно конфигурируемой структурой (ВСГ-СК) включает три основные части. Значительной особенностью ВСГ-СК является появление дополнительных двух уровней, которые условно могут быть разделены на верхний и нижний, функционирующие параллельно. Верхний уровень осуществляет формирование уставок по активной и реактивной мощностям для генерирующей установки. При этом предложенная в работе модель ВСГ-СК естественным образом решает фундаментальные проблемы, присущие традиционной последовательной структуре ВСГ с жестким направлением сигналов, такие как нелинейная зависимость между управлением активной и реактивной мощностями (без использования дополнительных контуров управления), что усложняет результирующую систему управления.

Важно отметить, что эффективность работы ВСГ зависит не только от структуры системы управления, но и от ее правильной настройки. Это становится предметом отдельных исследований, учитывающих трудности моделирования крупномасштабных энергосистем и ВИЭ.

В ходе исследований различных вариантов конфигурации ВСГ-СК было выявлено, что структура с параллельной работой внутреннего и внешнего уровней управления является наиболее эффективной. На внутреннем уровне отражаются электромагнитные и механические свойства синхронного генератора, проявляющиеся только в переходных процессах. Внешний уровень используется для определения уставок активной и реактивной

мощностей, а также для регулирования реактивной мощности и напряжения. Более того, структура модели ВСГ-СК, предложенная в [9], допускает одновременное использование контуров регулирования активной и реактивной мощностей для подавления колебаний, обеспечивая тем самым более эффективное функционирование по сравнению со случаем использования только одного из них.

Обзор методов повышения устойчивости работы возобновляемых источников энергии при использовании систем накопления энергии. Поддержка частоты в РГ может быть осуществлена с помощью метода разгрузки фотоэлектрических панелей или ветрогенераторов, при котором система работает вдали от доступной точки максимальной мощности MPP (от англ. Maximum Power Point). Кроме того, разгрузка требует точной и динамической оценки доступной мощности системы для введения необходимого резерва [13]. Введение этого резерва мощности в РГ может быть реализовано с помощью ступенчатой характеристики мощности, управления инерцией или комбинации этих методов управления [14–17]. Однако метод разгрузки снижает производительность системы.

Использование систем накопления энергии ESS (от англ. Energy Storage System). для поддержки частоты РГ исследовано в [18–20]. Система накопления энергии поглощает либо вводит мощность во время возмущений в соответствии с производной частоты сети, чтобы имитировать реакцию инерции. Однако наличие производной составляющей частоты в системе управления ухудшает устойчивость системы [21]. Применение суперконденсатора для улучшения частотных характеристик и подавления колебаний мощности между сетями с использованием виртуального инерционного контроллера без производной частоты представлено в работе [22]. Ток суперконденсатора регулируется в соответствии с отклонением частоты сети, реализуя свой запас энергии. Поэтому обязательна быстрая вторичная система управления для восстановления номинального значения частоты во избежание продолжительной разрядки суперконденсатора. Кроме того, каждая фотоэлектрическая батарея и суперконденсатор имеют отдельный преобразователь постоянного тока в переменный. Высокая мощность суперконденсатора и высокая плотность энергии батареи

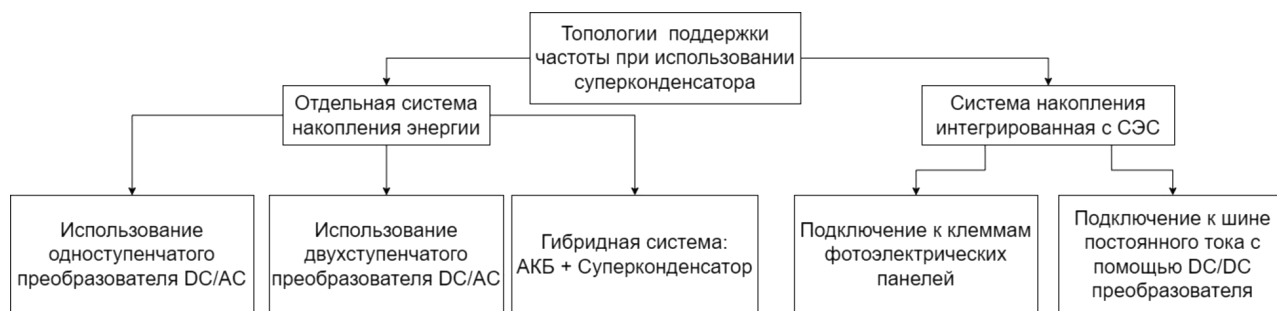


Рис. 1. Стратегии применения суперконденсатора в целях поддержки частоты
Fig. 1. Supercapacitor application strategies to maintain frequency

используются для увеличения частоты сети в работах [23, 24]. Однако для снижения стоимости и сложности управления гибридная система накопления энергии HESS (от англ. Hybrid Energy Storage System) соединяется с сетью с помощью одного преобразователя постоянного тока в переменный. HESS поддерживает частоту сети, имитируя инерцию синхронных генераторов при управлении DC/AC с использованием управления ВСГ, в то время как преобразователи постоянного тока регулируют напряжение в звене постоянного тока инвертора. Для дальнейшего снижения стоимости системы преобразователь постоянного тока для фотоэлектрических модулей и HESS может использовать один и тот же инвертор [25]. В [25] для управления инвертором применяется комбинация методов виртуального синхронного генератора, производной частоты и контроля отклонения частоты. Краткое изложение топологий поддержки частоты, описанных в специализированной литературе, с использованием суперконденсатора приведено на рис. 1.

Емкость звена постоянного тока инвертора фотоэлектрических систем PV (от англ. Photovoltaic) может использоваться для поддержки частоты, в то время как обычный конденсатор характеризуется малой энергоемкостью и малой мощностью. Таким образом, поддержка инерции с помощью обычных конденсаторов очень ограничена и дает большее отклонение при вторичном регулировании частоты для небольшого улучшения амплитудно-частотной характеристики [26]. Чтобы преодолеть эти проблемы, исследователи предложили координировать метод управления обычного конденсатора с методом разгрузки [26, 27]. Однако управление напряжением суперконденсатора смещает рабочую точку PV от MPP. Использование отдельного суперконденсатора с одноступенчатым или двух-

ступенчатым преобразователем постоянного тока в переменный для поддержки частоты увеличивает стоимость силовой электроники и усложняет управление. Однако большую часть времени фотоэлектрическая система работает в точке максимальной мощности. С другой стороны, использование метода разгрузки без ESS снижает эффективность системы и имеет экономические недостатки. В [27] суперконденсатор интегрируется в шину постоянного тока инвертора фотоэлектрической сети и применяется для управления напряжением на основе отклонения частоты. Изменение напряжения суперконденсатора в зависимости от частоты поглощает либо вводит мощность в сеть, что улучшает частотную характеристику. В [28] суперконденсатор интегрирован в звено постоянного тока инвертора ветровой турбины с допустимым изменением напряжения 20%, что ограничивает использование запасенной энергии суперконденсатора до 36% от его номинальной мощности. С другой стороны, для лучшего использования запасенной энергии суперконденсатора напряжение суперконденсатора должно широко варьироваться.

В работе [29] основное внимание уделено суперконденсаторам, но те же принципы можно применить и к батареям. В контексте РГ ESS на основе суперконденсаторов состоит из преобразователя на стороне сети GSC (от англ. Grid Side Converter) и двунаправленного преобразователя постоянного тока. В случае РГ, подключенных к сети, GSC представляет собой преобразователь источника напряжения, который обеспечивает передачу мощности между энергосистемой и ESS путем регулирования напряжения в звене постоянного тока. Среди других методов управления нелинейные методы, основанные на системах с переменной структурой и скользящем режиме

SM (от англ. sliding mode), являются особенно подходящими теориями для коммутируемых систем, таких как силовые преобразователи. Методы SM позволяют комбинировать элементы с различными назначениями, а также обеспечивают довольно простую реализацию. Таким образом, для силовых преобразователей, работающих в условиях высокой изменчивости, алгоритмы SM становятся естественным выбором, учитывая их способность принимать большие сигналы. В [29] предлагается идея, которая заключается в том, чтобы рассмотреть стратегию управления SM для двунаправленного преобразователя постоянного тока для ESS на основе суперконденсаторов в контексте использования в РГ. Стратегия охватывает все условия эксплуатации: запуск, постоянную мощность и ограничение напряжения. Вся стратегия реализована в рамках теории SM, в отличие от других методов, которые объединяют разные стратегии и не предусматривают всех этих режимов работы. Данная характеристика обеспечивает надежность управления SM и гибкость для простого выбора различных режимов работы. Таким образом, система может работать в состоянии с нулевым накоплением энергии, обмениваться энергией с РГ при нормальной работе и отключаться без необходимости вмешательства человека. Контроллер автоматически переключается между этими режимами. Также в [29] представлены анализ стабильности и экспериментальные результаты при максимальных рабочих условиях. Насколько известно, управление суперконденсатором ранее упомянутым способом, в контексте РГ и с исчерпывающими экспериментальными тестами, не рассматривалось глубоко в списке источников.

В исследовании [31] авторы вводят конденсатор вместе с виртуальным резистором для распределения различных компонентов нагрузки по системам накопления энергии. Тем не менее остаются проблемы регулирования напряжения основной шины. Чтобы преодолеть этот недостаток, авторы в [32] предлагают кооперативную и виртуальную емкостную стратегию управления для координации распределения мощности между ESS, распределенными в сети. В [33] и [34] стратегия управления виртуальным конденсатором используется для улучшения управления напряжением на шине постоянного тока в случае изменения опорного напряжения. Однако более высокая

виртуальная емкость и большая постоянная времени приводят к более медленному отклику. Поэтому при выборе виртуальной емкости необходимо найти компромисс между скоростью изменения напряжения на шине постоянного тока и стабильностью. Кроме того, эта стратегия не обеспечивает хорошей производительности, когда возникают возмущения нагрузки.

В [30] предлагается стратегия управления напряжением на шине постоянного тока, основанная на виртуальной инерции, для двунаправленного преобразователя постоянного тока с интегрированной системой суперконденсатора-ESS в изолированной сети постоянного тока. Суперконденсаторы с большим сроком службы и малым временем отклика могут компенсировать пиковую мощность [25]. Быстродействующие ESS могут имитировать инерционные отклики с помощью определенного алгоритма управления [33]. Следовательно, суперконденсаторы являются правильным выбором для инерционной установки в сети постоянного тока:

1) поскольку аккумуляторная батарея не может реагировать достаточно быстро при изменении нагрузки, СК компенсирует несбалансированную энергию;

2) СК может обеспечивать пиковую мощность, поэтому номинальная мощность батареи может быть снижена.

Применение различных контроллеров поддержки частоты требует некоторого запаса энергии или запаса мощности. Кинетическая энергия, запасенная в лопасти ротора, редукторе и роторе генератора ветрогенерирующей системы, используется в качестве источника энергии для поддержания частоты РГ в [35]. Однако фотоэлектрическая система не имеет вращающихся частей, а единственными элементами, которые могут хранить энергию, являются емкость звена постоянного тока и индуктивность преобразователей. Энергия, накопленная в конденсаторе звена постоянного тока преобразователя фотоэлектрического модуля, используется для поддержки частоты РГ через VIC в [36]. Однако инерционная уставка, использующая запасенную энергию конденсатора звена постоянного тока, ограничена допустимой динамикой напряжения постоянного тока и размерами конденсатора. Альтернативным способом обеспечения поддержки частоты является стратегия разгрузки,

при которой PV работает вдали от своей MPP. Разница между доступной максимальной мощностью и потребляемой мощностью используется в качестве резерва для поддержки частоты во время колебаний нагрузки. Основным преимуществом разгрузки является отсутствие дополнительных вложений в дополнительные элементы и менее сложное управление. С другой стороны, стратегия разгрузки снижает коэффициент использования мощности станции ВИЭ. В [37] VIC координируется с управлением частотным демпфированием для фотоэлектрической системы, чтобы максимизировать использование допустимого резерва мощности для поддержки частоты. Величина запаса мощности может быть фиксированной или определяться в процентах от текущей генерации [38]. Фиксированный резерв может привести к полной потере генерации, если доступная мощность меньше резервной. В [39] контроллер с нечеткой логикой использовался для оптимизации процента резерва мощности в соответствии с текущей инерцией сети. Из-за этого техника разгрузки снижает производительность и прибыль.

В [23] система хранения энергии, состоящая из суперконденсатора и батареи, используется для реализации управления ВСГ. Коэффициенты демпфирования и инерции ВСГ оптимизируются с помощью метода оптимизации роя частиц PSO (от англ. Particle Swarm Optimization). Рассматриваются две различные целевые функции: первая представляет собой интегральную абсолютную погрешность частоты, тогда как вторая целевая функция учитывает интегральную абсолютную погрешность, отклонение частоты и скорость изменения частоты ROCOF. Основные результаты этой работы сводятся к следующему: проектирование гибридной системы накопления энергии суперконденсатор/батарея на основе ВСГ с одновременным отклонением частоты и ROCOF для улучшения частотной характеристики при различных возмущениях; метод PSO используется для оптимизации параметров контроллера ВСГ и они автоматически определяются для снижения трудоемкости проектирования, стоимости и учета нелинейности системы, преобразователей и взаимодействия между элементами РГ. Предлагаемая в [17] ГЭС на основе управления ВСГ является системообразующим элементом, который может работать с ВИЭ без необходимо-

сти использования традиционных источников энергии. Таким образом, повышается надежность электроснабжения при выходе из строя узлов, формирующих сеть.

В [36, 37] применяются дополнительные контуры управления ветрогенератором, чувствительные к частоте, такие как управление статизмом и управление инерцией для регулирования частоты. Но этот метод может привести к высоким механическим нагрузкам на генераторах. Кроме того, эта стратегия снижает выработку энергии и может быть нежелательной с экономической точки зрения. В [39] контуры управления реализуются идеальным источником постоянного напряжения, подключенным к инвертору. Учитывая мощность инвертора, в ВЭС включаются системы накопления энергии для достижения частотного регулирования. Между тем с момента предложения концепции кластеров РГ было проведено несколько исследований по их управлению и эксплуатации. Структура энергосистемы с кластерами РГ представлена на рис. 2.

В связи с перебоями выходной мощности РГ для повышения безопасности и надежности электроснабжения необходимы межсетевые РГ. Две соседние РГ соединяются между собой, образуя кластеры РГ, и каждая сеть может обмениваться энергией в случае возникновения чрезвычайной ситуации. В традиционной объединенной энергосистеме слабое демпфирование может вызывать колебания мощности между частями энергосистемы. Точно так же автономные РГ имеют низкую инерцию и слабое демпфирование, поэтому они могут привести к нестабильности системы, когда взаимосвязаны для формирования кластеров РГ. Ввиду вышеупомянутого пробела в исследованиях в [40] изучается анализ динамической устойчивости автономных взаимосвязанных кластеров РГ и новая стратегия управления виртуальной инерцией для улучшения динамической устойчивости. В работе [40] свойство суперконденсатора используется для имитации реакции динамической инерции. В этой работе с учетом состояния заряда SOC (от англ. State of Charge) суперконденсатора определяется инерция стационарного накопителя энергии. Это новое определение суперконденсатора устанавливает связь между SOC, автономными кластерами РГ переменного тока и мощностью суперконденсаторов. Взаимодействие фотоэлектриче-

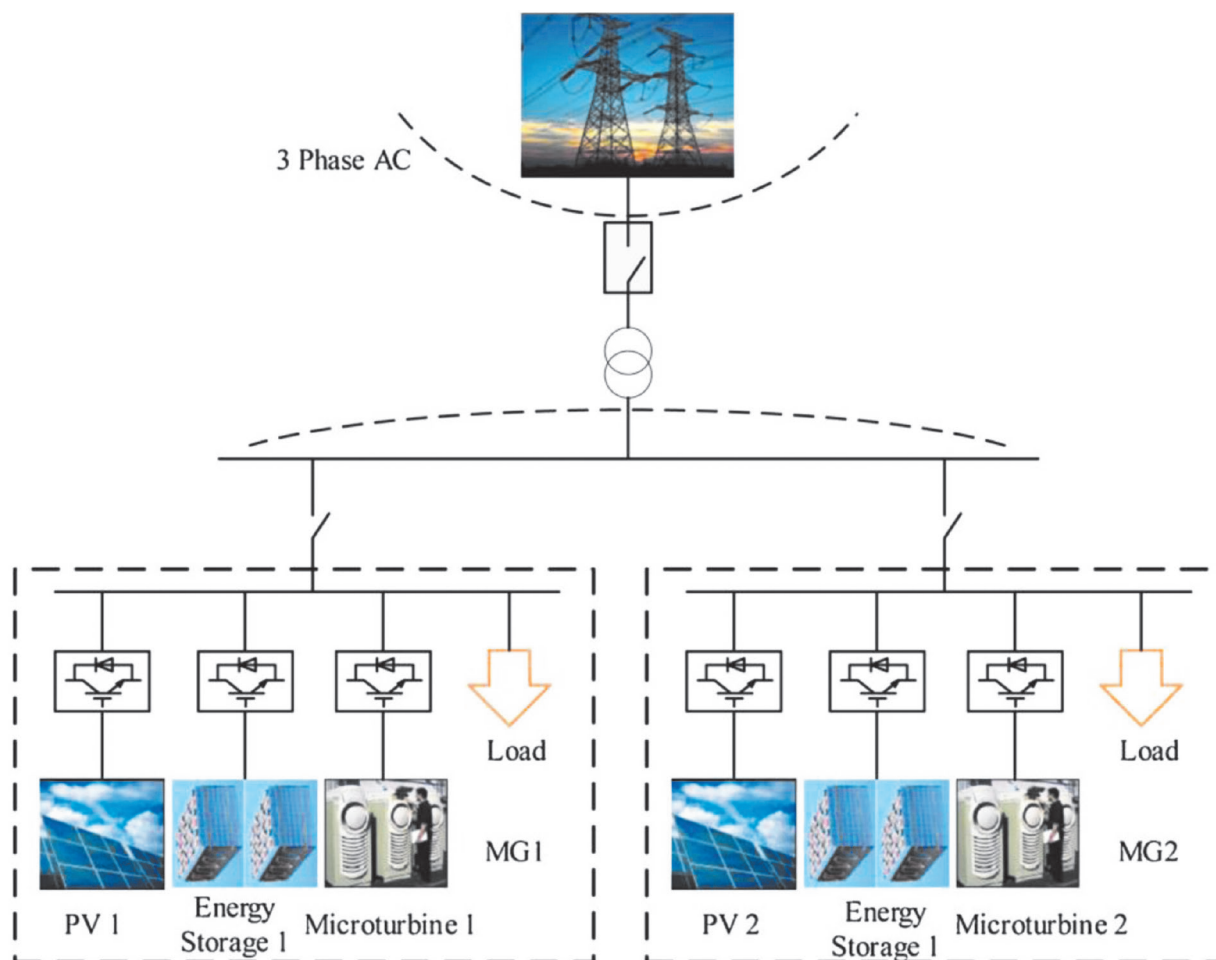


Рис. 2. Структура кластеров распределенной генерации
Fig. 2. Structure of distributed generation clusters

ских станций может привести к колебаниям мощности. В соответствии с анализом динамической устойчивости взаимосвязанных кластеров РГ переменного тока и анализом констант динамической инерции суперконденсаторов предлагается регулируемая стратегия управления виртуальной инерцией. На основе изменения частоты кластеров РГ переменного тока суперконденсаторы могут демонстрировать быструю реакцию активной мощности для повышения динамической стабильности. Рассматриваемая в [40] схема управления направлена на решение проблемы низкой инерции и слабого демпфирования автономных взаимосвязанных кластеров фотоэлектрической РГ.

В [41] также рассматривается гибридная система накопления энергии из аккумуляторной батареи и суперконденсатора для управления инерцией ВСГ. В частности, суперконденсатор используется для эмуляции инерции ВСГ. Другая часть ВСГ, а именно управление

статизмом, эмулируется батареей, поскольку она может компенсировать относительно длительные колебания мощности с медленной динамикой. В этом случае можно полностью использовать преимущества суперконденсатора и батареи для реализации системы ВСГ. Кроме того, поскольку HESS используется для имитации коэффициента инерции, управления статической характеристикой, регулятора скорости и турбины ВСГ, параметры управления для HESS могут быть легко определены на основе модели ВСГ. Номинальные значения мощности суперконденсатора и батареи, соответственно, получены из эмуляции виртуальной инерции и остальных частей управления ВСГ, а не из обычных фильтров нижних/высоких частот. Однако в этой работе не уделяется вопрос изменения напряжения и перенапряжения.

Гибридная система хранения энергии с аккумуляторной батареей и суперконденсатором имеет естественные преимущества, которые

могут увеличить срок службы аккумуляторной батареи и эффективность системы. Системы аккумуляторных батарей могут обеспечивать энергию в течение длительного времени с более высокой плотностью энергии и меньшей плотностью мощности. Суперконденсатор обеспечивает буферизацию мощности для других систем хранения энергии с более высокой плотностью мощности и более низкой плотностью энергии. Комбинация двух форм накопления энергии может дополнять преимущества друг друга и повышать практичность системы. В [42] предлагают стратегию управления гибридной системой накопления энергии на основе батареи и суперконденсатора в обычных инверторах. Управление разделено на четыре режима, соответствующих различным рабочим состояниям. Однако общая схема управления сложнее, и в реальной ситуации определение рабочей модели затруднено. В [43] предлагают стратегию управления системой ВСГ, основанную на накоплении энергии батареи, и дают конкретный метод управления, но в литературных источниках не упоминаются сценарии с непрерывными быстрыми изменениями нагрузки. В [44] авторы сосредоточены на выборе аккумуляторной батареи в различных сценариях со стратегией управления ВСГ и предлагают алгоритм конфигурации батареи, применяемый к ВСГ в соответствии с различными целями оптимизации. Однако не рассматриваются различные типы вариантов накопления энергии, конфигурации и управление в системе ВСГ.

В [45] используется гибридная система накопления энергии, состоящая из батареи и суперконденсатора. Предлагается соответствующая стратегия управления для разложения выходной мощности виртуального синхронного генератора на две части, соответственно, используя преимущества батареи и суперконденсатора для удовлетворения соответствующей потребности в мощности.

Виртуальный синхронный генератор с гибридной системой накопления энергии, состоящей из аккумулятора и суперконденсатора, может сочетать в себе преимущества разных блоков. HESS также позволяет инвертору лучше имитировать инерцию синхронного генератора. Однако когда в системе ВСГ возникают колебания мощности, необходимо учитывать распределение мощности между различными накопителями энергии. В [46] предложен ме-

тод управления энергопотреблением HESS, применяемый к обычным инверторам. Фильтр нижних частот используется для разделения высокочастотных и низкочастотных колебаний мощности для обеспечения распределения мощности между суперконденсатором и аккумуляторной батареей. Однако расчет частоты среза фильтра нижних частот не приводится в [47]. В [48] показана стратегия управления, используемая в системе ВСГ с аккумуляторным накопителем энергии, которая управляет системой путем изменения коэффициента статизма. В [48] рассматривается метод распределения энергии посредством усовершенствования метода управления, чтобы суперконденсатор компенсировал высокочастотные колебания мощности, а батарея компенсировала низкочастотные колебания мощности. Однако срок службы батареи не учитывается, что не совсем разумно в случае сильных колебаний мощности. В [49] представлен метод управления с обратной связью SOC батареи, используемый в системе виртуального синхронного генератора с HESS. Поскольку он учитывает SOC батареи, по сравнению с обычной стратегией управления, то может избежать сокращения срока службы, вызванного перезарядкой. Это более экономично. Однако в данной работе не рассматривается вопрос регулирования напряжения при использовании такой системы.

В [50] рассматривается проблема совместного регулирования частоты энергосистемы ветрогенератора на основе синхронной машины на постоянных магнитах и суперконденсаторов. Исследуется проблема вторичного падения частоты после реализации поддержки частоты ветрогенераторов путем высвобождения их кинетической мощности. Доступная кинетическая энергия ветрогенераторов в нормальных условиях эксплуатации может покрыть поддержку частоты только в масштабе времени 10 с. Однако в случае непредвиденных обстоятельств контроль частоты системы обычно длится несколько минут. Таким образом, кинетической энергии недостаточно для поддержания частоты, и проблема вторичного падения частоты остается нерешенной. В [50] авторы предлагают систему совместного использования методов поддержки частоты на основе высвобождения кинетической инерции роторов и применении систем накопления энергии, состоящей из суперконденсаторов.

Рассматриваются два контура с разными коэффициентами управления для высвобождения искусственной инерции и DC/DC-преобразователя суперконденсатора соответственно.

Устойчивость работы ветрогенераторов наиболее остро стоит в изолированных энергосистемах. Данные системы наиболее сильно подвержены влиянию наиболее распространенным однофазным замыканиям, которые приводят к отключению генераторов. При этом нарушается баланс выработки и потребления энергии, при котором остальные генераторы не позволяют обеспечить необходимую мощность, и частота в энергосистеме падает. Также при отключении части нагрузки наблюдается переизбыток активной мощности, что способствует ускорению генераторов. В условиях автономной энергосистемы данный вид нарушений может привести к асинхронному режиму оставшихся в работе генераторов. В целях повышения устойчивости работы ветрогенераторов, сохранения их синхронности в работах [51–53] рассматривается возможность регулирования скорости вращения ветрогенераторов с помощью магнитной трансмиссии. Магнитная трансмиссия обладает существенными преимуществами по сравнению с механическими: снижение массогабаритных показателей, увеличение КПД за счет минимального трения, снижение нагрева и улучшение эксплуатационных показателей. Один из вариантов предполагает формирование вращающего момента, который компенсирует возмущающий момент, при этом реализуется стабилизация скорости. Второй вариант обеспечивает формирование дополнительной скорости вращения генератора при неизменном вращающем моменте, и в результате суммирования скоростей изменяется передаточное отношение. Трансмиссия с таким построением играет роль магнитного вариатора. Авторы работы утверждают, что применение данного способа повышения устойчивости ветрогенераторов при резком изменении нагрузки на 40% показали восстановление параллельной работы синхронных генераторов с постоянными магнитами через 10 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведен анализ работ, посвященных снижению негативного влияния возобновляемых источников энергии на энергосистему. Пока-

зано, что развитие технологий, позволяющих повысить регулировочные способности электростанции на основе возобновляющих источников энергии, является актуальной задачей, так как их низкая инерция приводит к снижению устойчивости энергосистем. Из анализа литературных источников следует, что одним из решений повышения устойчивости таких энергосистем является создание виртуальной инерции ветроэнергетических установок и солнечных панелей. Однако ввиду ограниченной мощности отдельных генерирующих установок, эффективность внедрения виртуальной инерции может быть недостаточной при ее независимой реализации на отдельных агрегатах. В связи с этим показано, что многообещающим решением может стать создание виртуальной инерции на основе гибридной системы, состоящей из суперконденсатора и генерирующей установки, управляемой на основе метода виртуального синхронного генератора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном обзоре выполнен анализ специализированных источников по вопросу методов реализации виртуальной инерции в условиях работы энергосистем с ветровыми и солнечными электростанциями. Сделан вывод о том, что на сегодняшний день проблема устойчивости энергосистем при внедрении ветровых и солнечных станций стоит наиболее остро. Ввиду того, что генерирующие установки на основе возобновляющих источников энергии часто соединены с энергосистемами через силовые преобразователи, они имеют меньшую инерционность по сравнению с традиционными синхронными генераторами, что негативно отражается на устойчивости энергосистем к резким изменениям режима работы. Поэтому широко исследуются различные методы для повышения устойчивости их работы, такие как применение систем накопления энергии, магнитные редукторы, системы их управления. В качестве систем накопления энергии могут использоваться аккумуляторные батареи, суперконденсаторы или их комбинация. Гибридная система накопления энергии, состоящая из двух типов источников, позволяет использовать преимущества каждого источника, дополняя друг друга. Для их управления используется алгоритм искусственной инерции, который позволяет имитировать поведение син-

хронного генератора, повышая таким образом инерцию системы. Ввиду всего вышесказанного тема повышения устойчивости систем с

генерирующими установками на основе ВИЭ является актуальной и требует дальнейших исследований.

Список источников

1. Mosa M.A., Yousef M.Y., Masry S.M.E., Ghany A.M.A., Ali A.A. Frequency support of AC microgrid with high penetration of photovoltaic using super-capacitor // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 53. Part A. P. 102364. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102364>.
2. Rezkalla M., Pertl M., Marinelli M. Electric power system inertia: requirements, challenges, and solutions // *Electrical Engineering*. 2018. Vol. 100. P. 2677–2693. <https://doi.org/10.1007/s00202-018-0739-z>.
3. Xiong Liansong, Liu Xiaokang, Zhang Donghui, Liu Yonghui. Rapid power compensation-based frequency response strategy for low-inertia power systems // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2021. Vol. 9. Iss. 4. P. 4500–4513. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2020.3032063>.
4. Johnson S.C., Rhodes J.D., Webber M.E. Understanding the impact of nonsynchronous wind and solar generation on grid stability and identifying mitigation pathways // *Applied Energy*. 2020. Vol. 262. P. 114492. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114492>.
5. Cheema K.M. A comprehensive review of virtual synchronous generator // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 120. P. 106006. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106006>.
6. Unamuno E., Barrena J.A. Design and small-signal stability analysis of a virtual-capacitor control for dc microgrids // 19th European Conference on Power Electronics and Applications. 2017. <https://doi.org/10.23919/EPE17ECCEEurope.2017.8098923>.
7. Суворов А.А., Аскаров А.Б., Рудник В.Е., Андреев М.В., Бай Ю.Д. Синтез и тестирование типовых структур систем автоматического управления на основе виртуального синхронного генератора для генерирующих установок с силовым преобразователем // *Электрические станции*. 2022. № 3. P. 43–57. <http://doi.org/10.34831/EP.2022.1088.3.006>. EDN: DTZCNI.
8. Askarov A.B., Suvorov A.A., Andreev M.V., Gusev A.S. A review and comparison of current trends in virtual synchronous generator's models // *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol 55. Iss. 9. P. 350–355. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.061>.
9. Суворов А.А., Аскаров А.Б., Андреев М.В., Бай Ю.Д., Рудник В.Е. Система автоматического управления силовым преобразователем на основе свободно конфигурируемой структуры виртуального синхронного генератора // *Электричество*. 2022. № 4. С. 15–26. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-4-15-26>. EDN: QLMNUD.
10. Suvorov A., Askarov A., Bay Yu., Ufa R. Freely Customized virtual generator model for grid-forming converter with hydrogen energy storage // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. Iss. 82. P. 34739–4761. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.119>.
11. Li Pengfei, Hu Weihao, Xu Xiao, Qi Huang, Liu Zhou, Chen Zhe. A frequency control strategy of electric vehicles in microgrid using virtual synchronous generator control // *Energy*. 2019. Vol. 189. P. 116389. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116389>.
12. Verma P, Kaur T, Kaur R. Power control strategy of an integrated PV system for active power reserve under dynamic operating conditions // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021. Vol. 45. P. 101066. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101066>.
13. Jibji-Bukar F, Anaya-Lara O. Frequency support from photovoltaic power plants using offline maximum power point tracking and variable droop control // *IET Renewable Power Generation*. 2019. Vol. 13. P. 2278–2286. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0211>.
14. Rajan R., Fernandez F.M. Power control strategy of photovoltaic plants for frequency regulation in a hybrid power system // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019. Vol. 110. P. 171–183. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.03.009>.
15. Feldmann D., De Oliveira R.V. Operational and control approach for PV power plants to provide inertial response and primary frequency control support to power system black-start // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021. Vol. 127. P. 106645. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106645>.
16. Kanwal S., Khan B., Ali S.M., Mehmood C.A. Gaussian process regression based inertia emulation and reserve estimation for grid interfaced photovoltaic system // *Renewable Energy*. 2018. Vol. 126. P. 865–875. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.012>.
17. Kerdphol T., Rahman F.S., Watanabe M., Mitani Ya., Turschner D., Beck H.-P. Enhanced virtual inertia control based on derivative technique to emulate simultaneous inertia and damping properties for microgrid frequency regulation // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 14422–14433. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2892747>.
18. Saxena P., Singh N., Pandey A.K. Enhancing the dynamic performance of microgrid using derivative controlled solar and energy storage based virtual inertia system // *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 31. P. 101613. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101613>.
19. Zhong Cheng, Li Huayi, Zhou Yang, Lv Yueming, Chen Jikai, Li Yang. Virtual synchronous generator of PV generation without energy storage for frequency support in autonomous microgrid // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. Vol. 134. P. 107343. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107343>.
20. Зырянов В.М., Мячина А.В., Нестеренко Г.Б. Применение систем накопления энергии для интеграции солнечных электростанций в традиционные энергосистемы // *Вести в электроэнергетике*. 2020. № 5. P. 47–58. EDN: RQRNZA.

21. Yang Li, Hu Zhijian, Xie Shiwei, Kong Shunfei, Lin Weiwei. Adjustable virtual inertia control of supercapacitors in PV-based AC microgrid cluster // *Electric Power Systems Research*. 2019. Vol. 173. P. 71–85. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.04.011>.
22. Nguyen Van Tan, Le Thanh Bac, Vo Quang Son, Dao Huu Dan. Stability analysis of an isolated microgrid with the presence of the hybrid energy storage system-based virtual synchronous generator // *Journal of Science and Technology*. 2020. Vol. 18. No. 6. P. 46–51. <https://doi.org/10.31130/jst-ud2020-101E>.
23. Mohamed M.M., El Zoghby H.M., Sharaf S.M., Mosa M.A. Optimal virtual synchronous generator control of battery/supercapacitor hybrid energy storage system for frequency response enhancement of photovoltaic/diesel microgrid // *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 51. P. 104317. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104317>.
24. Sarojini R.K., Kaliannan P., Teekaraman Y., Nikolovski S., Baghaee H.R. An enhanced emulated inertia control for grid-connected pv systems with HESS in a weak grid // *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 6. P. 1721. <https://doi.org/10.3390/en14061721>.
25. Huang Xin, Wang Keyou, Li Guojie, Zhang Hua. Virtual inertia-based control strategy of two-stage photovoltaic inverters for frequency support in islanded micro-grid // *Electronics*. 2018. Vol. 7. Iss. 11. P. 340. <https://doi.org/10.3390/electronics7110340>.
26. Lyu Xue, Xu Zhao, Zhao Jian. A coordinated frequency control strategy for photovoltaic system in microgrid // *Journal of International Council on Electrical Engineering*. 2018. Vol. 8. Iss. 1. P. 37–43. <https://doi.org/10.1080/22348972.2018.1470295>.
27. Zhang Xing, Gao Qian, Guo Zixuan, Zhang Haizheng, Li Ming, Li Fei. Coordinated control strategy for a PV-storage grid-connected system based on a virtual synchronous generator // *Global Energy Interconnection*. 2020. Vol. 3. Iss. 1. P. 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2020.03.003>.
28. Xiong Liansong, Li Yujun, Zhu Yixin, Yang Ping, Xu Zhirong. Coordinated control schemes of super-capacitor and kinetic energy of DFIG for system frequency support // *Energies*. 2018. Vol. 11. Iss. 1. P. 103. <https://doi.org/10.3390/en11010103>.
29. Inthamoussou F.A., Pegueroles-Queralt J., Bianchi F.D. Control of a supercapacitor energy storage system for microgrid applications // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2013. Vol. 28. Iss. 3. P. 690–697. <https://doi.org/10.1109/TEC.2013.2260752>.
30. Jami M., Shafiee Q., Gholami M., Bevrani H. Control of a super-capacitor energy storage system to mimic inertia and transient response improvement of a direct current micro-grid // *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 32. P. 101788. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101788>.
31. Xu Qianwen, Hu Xiaolei, Wang Peng, Xiao Jianfang, Tu Pengfei, Wen Changyun, et al. A decentralized dynamic power sharing strategy for hybrid energy storage system in autonomous dc microgrid // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017. Vol. 64. Iss. 7. P. 5930–5941. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2608880>.
32. Zhang Runfan, Hredzak B., Morstyn T. Distributed control with virtual capacitance for the voltage restorations state of charge balancing and load allocations of heterogeneous energy storages in a DC datacenter microgrid // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2019. Vol. 34. Iss. 3. P. 1296–1308. <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2889065>.
33. Unamuno E., Barrena J.A. Equivalence of primary control strategies for ac and dc microgrids // *Energies*. 2017. Vol. 10. Iss. 1. P. 91. <https://doi.org/10.3390/en10010091>.
34. Huang Linbin, Xin Huanhai, Wang Zhen, Wu Kuayu, Wang Haijiao, Jiabing Hu, et al. A virtual synchronous control for voltage-source converters utilizing dynamics of DC-link capacitor to realize self-synchronization // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2017. Vol. 5. Iss. 4. P. 1565–1577. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2017.2740424>.
35. Peng Qiao, Yang Yongheng, Liu Tianqi, Blaabjerg F. Coordination of virtual inertia control and frequency damping in PV systems for optimal frequency support // *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*. 2020. Vol. 5. Iss. 4. P. 305–316. <https://doi.org/10.24295/CPSSTPEA.2020.00025>.
36. Arani M.F.M., Mohamed Ya.A.-R.I. Analysis and impacts of implementing droop control in DFIG-based wind turbines on microgrid/weak-grid stability // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2015. Vol. 30. Iss. 1. P. 385–396. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2321287>.
37. Hafiz F., Abdennour A. Optimal use of kinetic energy for the inertial support from variable speed wind turbines // *Renewable Energy*. 2015. Vol. 80. P. 629–643. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.051>.
38. Li Dongdong, Zhu Qianwei, Lin Shunfu, Bian Xiaoyan. A self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2017. Vol. 32. Iss. 1. P. 397–398. <https://doi.org/10.1109/TEC.2016.2623982>.
39. Liu Ju, Yang Dongjun, Yao Wei, Fang Rengcun, Zhao Hongsheng, Wang Bo. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system // *Protection and Control of Modern Power Systems*. 2017. Vol. 2. Iss. 4. P. 429–437. <https://doi.org/10.1186/s41601-017-0070-0>.
40. Yang Li, Hu Zhijian, Xie Shiwei, Kong Shunfei, Lin Weiwei. Adjustable virtual inertia control of supercapacitors in PV-based AC microgrid cluster // *Electric Power Systems Research*. 2019. Vol. 173. P. 71–85. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.04.011>.
41. Fang Jingyang, Tang Yi, Li Hongchang, Li Xiaoqiang. A battery ultracapacitor hybrid energy storage system for implementing the power management of virtual synchronous generators // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018. Vol. 33. Iss. 4. P. 2820–2824. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2759256>.

42. Hazra S., Bhattacharya S. Hybrid energy storage system comprising of battery and ultra-capacitor for smoothing of oscillating wave energy // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. 2016. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7855172>.
43. Fang Jingyang, Yi Tang, Li Hongchang, Li Xiaoqiang. A battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for implementing the power management of virtual synchronous generators // IEEE Transactions on Power Electronics. 2018. Vol. 33. Iss. 4. P. 2820–2824. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2759256>.
44. Vassilakis A., Kotsampopoulos P., Hatziaargyriou N., Karapanos V. A battery energy storage based virtual synchronous generator // IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control - IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid. 2013. <https://doi.org/10.1109/IREP.2013.6629425>.
45. Huiyu Miao, Chenyu Zhang, Fei Mei, Yun Yang, Jianyong Zheng. A novel control strategy for hybrid energy system in virtual synchronous generator // 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (Wuhan, 31 May – 2 June 2018). Wuhan: IEEE, 2018. P. 2244–2249. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2018.8398083>.
46. Zhang Qiao, Wang Lijia, Li Gang, Liu Yan. A real-time energy management control strategy for battery and supercapacitor hybrid energy storage systems of pure electric vehicles // Journal of Energy Storage. 2020. Vol. 31. P. 101721. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101721>.
47. Xincheng Zhao, Wang Xincheng, Ke Wang. Research for virtual synchronous generator with considering energy storage system // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 486. P. 012048. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/486/1/012048>.
48. Fang Jingyang, Tang Yi, Li Hongchang, Li Xiaoqiang. A battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for implementing the power management of virtual synchronous generators // IEEE Transactions on Power Electronics. 2018. Vol. 33. Iss. 4. P. 2820–2824. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2759256>.
49. Shi Mingming, Chen Hongfei, Zhang Chenyu, Mei Fei, Fang Jicheng, Miao Huiyu. A virtual synchronous generator system control method with battery SOC feedback // 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration. 2018. <https://doi.org/10.1109/EI2.2018.8582563>.
50. Wang Ruiming, Qin Shiyao, Bao Weiyu, Hou Anxiang, Ying You, Ding Lei. Configuration and control strategy for an integrated system of wind turbine generator and supercapacitor to provide frequency support // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2023. Vol. 154. P. 109456. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109456>.
51. Udalov S.N., Achitaev A.A., Pristup A.G., Bochenkov B.M., Pankratz Yu., Tarbill R.D. Increasing the regulating ability of a wind turbine in a local power system using magnetic continuous variable transmission // Wind Engineering. 2018. Vol. 42. Iss. 5. P. 411–435. <https://doi.org/10.1177/0309524X18780404>. EDN: YBTNTB.
52. Удалов С.Н., Ачитаев А.А., Приступ А.Г., Боченков Б.М. Повышение запаса динамической устойчивости автономной энергетической системы на базе ветроэнергетических установок при резких изменениях режима нагрузки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 8. С. 89–98. EDN: RSYLYW.
53. Удалов С.Н., Приступ А.Г., Ачитаев А.А. Исследование магнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением в ветроэнергетической установке в целях повышения запаса динамической устойчивости // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 10. С. 123–134. EDN: VOQZHB.

References

1. Mosa M.A., Yousef M.Y., Masry S.M.E., Ghany A.M.A., Ali A.A. Frequency support of AC microgrid with igh penetration of photovoltaic using super-capacitor. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022;53(A):102364. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102364>.
2. Rezkalla M., Pertl M., Marinelli M. Electric power system inertia: requirements, challenges, and solutions. *Electrical Engineering*. 2018;100:2677-2693. <https://doi.org/10.1007/s00202-018-0739-z>.
3. Xiong Liansong, Liu Xiaokang, Zhang Donghui, Liu Yonghui. Rapid power compensation-based frequency response strategy for low-inertia power systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2021;9(4):4500-4513. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2020.3032063>.
4. Johnson S.C., Rhodes J.D., Webber M.E. Understanding the impact of nonsynchronous wind and solar generation on grid stability and identifying mitigation pathways. *Applied Energy*. 2020;262:114492. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114492>.
5. Cheema K.M. A comprehensive review of virtual synchronous generator. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020;120:106006. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106006>.
6. Unamuno E., Barrena J.A. Design and small-signal stability analysis of a virtual-capacitor control for DC microgrids. In: *19th European Conference on Power Electronics and Applications*. 2017. <https://doi.org/10.23919/EPE17ECCEEurope.2017.8098923>.
7. Suvorov A.A., Askarov A.B., Rudnik V.E., Andreev M.V., Baj Yu.D. Synthesis and testing of typical automatic control system structures based on a virtual synchronous generator for generating plants with a power converter. *Elektricheskie stantsii = Power Technology and Engineering*. 2022;3:43-57. (In Russ.). <http://doi.org/10.34831/EP.2022.1088.3.006>. EDN: DTZCNI.
8. Askarov A.B., Suvorov A.A., Andreev M.V., Gusev A.S. A review and comparison of current trends in virtual synchronous generator's models. *IFAC-PapersOnLine*. 2022;55(9):350-355. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.061>.
9. Suvorov A.A., Askarov A.B., Andreev M.V., Baj Yu.D., Rudnik V.E. Power converter automatic control system based on a freely configurable structure of a virtual synchronous generator. *Elektrichestvo*. 2022;4:15-26. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-4-15-26>. EDN: QLMNUD.

10. Suvorov A., Askarov A., Bay Yu., Ufa R. Freely customized virtual generator model for grid-forming converter with hydrogen energy storage. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(82):34739-4761. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.119>.
11. Li Pengfei, Hu Weihao, Xu Xiao, Qi Huang, Liu Zhou, Chen Zhe. A frequency control strategy of electric vehicles in microgrid using virtual synchronous generator control. *Energy*. 2019;189:116389. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116389>.
12. Verma P, Kaur T, Kaur R. Power control strategy of an integrated PV system for active power reserve under dynamic operating conditions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021;45:101066. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101066>.
13. Jibji-Bukar F, Anaya-Lara O. Frequency support from photovoltaic power plants using offline maximum power point tracking and variable droop control. *IET Renewable Power Generation*. 2019;13:2278-2286. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0211>.
14. Rajan R., Fernandez F.M. Power control strategy of photovoltaic plants for frequency regulation in a hybrid power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019;110:171-183. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.03.009>.
15. Feldmann D., De Oliveira R.V. Operational and control approach for PV power plants to provide inertial response and primary frequency control support to power system black-start. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021;127:106645. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106645>.
16. Kanwal S., Khan B., Ali S.M., Mehmood C.A. Gaussian process regression based inertia emulation and reserve estimation for grid interfaced photovoltaic system. *Renewable Energy*. 2018;126:865-875. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.012>.
17. Kerdphol T., Rahman F.S., Watanabe M., Mitani Ya., Turschner D., Beck H.-P. Enhanced virtual inertia control based on derivative technique to emulate simultaneous inertia and damping properties for microgrid frequency regulation. *IEEE Access*. 2019;7:14422-14433. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2892747>.
18. Saxena P., Singh N., Pandey A.K. Enhancing the dynamic performance of microgrid using derivative controlled solar and energy storage based virtual inertia system. *Journal of Energy Storage*. 2020;31:101613. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101613>.
19. Zhong Cheng, Li Huayi, Zhou Yang, Lv Yueming, Chen Jikai, Li Yang. Virtual synchronous generator of PV generation without energy storage for frequency support in autonomous microgrid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022;134:107343. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107343>.
20. Zyryanov V.M., Myachina A.V., Nesterenko G.B. Using energy storage systems for solar power plant integration into traditional power systems. *Vesti v elektroenergetike = Electric Power News*. 2020;5:47-58. (In Russ.). EDN: RQRNZA.
21. Yang Li, Hu Zhijian, Xie Shiwei, Kong Shunfei, Lin Weiwei. Adjustable virtual inertia control of supercapacitors in PV-based AC microgrid cluster. *Electric Power Systems Research*. 2019;173:71-85. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.04.011>.
22. Nguyen Van Tan, Le Thanh Bac, Vo Quang Son, Dao Huu Dan. Stability analysis of an isolated microgrid with the presence of the hybrid energy storage system-based virtual synchronous generator. *Journal of Science and Technology*. 2020;18(6):46-51. <https://doi.org/10.31130/jst-ud2020-101E>.
23. Mohamed M.M., El Zoghby H.M., Sharaf S.M., Mosa M.A. Optimal virtual synchronous generator control of battery/supercapacitor hybrid energy storage system for frequency response enhancement of photovoltaic/diesel microgrid. *Journal of Energy Storage*. 2022;51:104317. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104317>.
24. Sarojini R.K., Kaliannan P., Teekaraman Y., Nikolovski S., Baghaee H.R. An enhanced emulated inertia control for grid-connected PV systems with HESS in a weak grid. *Energies*. 2021;14(6):1721. <https://doi.org/10.3390/en14061721>.
25. Huang Xin, Wang Keyou, Li Guojie, Zhang Hua. Virtual inertia-based control strategy of two-stage photovoltaic inverters for frequency support in islanded micro-grid. *Electronics*. 2018;7(11):340. <https://doi.org/10.3390/electronics7110340>.
26. Lyu Xue, Xu Zhao, Zhao Jian. A coordinated frequency control strategy for photovoltaic system in microgrid. *Journal of International Council on Electrical Engineering*. 2018;8(1):37-43. <https://doi.org/10.1080/22348972.2018.1470295>.
27. Zhang Xing, Gao Qian, Guo Zixuan, Zhang Haizheng, Li Ming, Li Fei. Coordinated control strategy for a PV-storage grid-connected system based on a virtual synchronous generator. *Global Energy Interconnection*. 2020;3(1):51-59. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2020.03.003>.
28. Xiong Liansong, Li Yujun, Zhu Yixin, Yang Ping, Xu Zhirong. Coordinated control schemes of super-capacitor and kinetic energy of DFIG for system frequency support. *Energies*. 2018;11(1):103. <https://doi.org/10.3390/en11010103>.
29. Inthamoussou F.A., Pegueroles-Queralt J., Bianchi F.D. Control of a supercapacitor energy storage system for microgrid applications. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2013;28(3):690-697. <https://doi.org/10.1109/TEC.2013.2260752>.
30. Jami M., Shafiee Q., Gholami M., Bevrani H. Control of a super-capacitor energy storage system to mimic inertia and transient response improvement of a direct current micro-grid. *Journal of Energy Storage*. 2020;32:101788. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101788>.
31. Xu Qianwen, Hu Xiaolei, Wang Peng, Xiao Jianfang, Tu Pengfei, Wen Changyun, et al. A decentralized dynamic power sharing strategy for hybrid energy storage system in autonomous DC microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017;64(7):5930-5941. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2608880>.
32. Zhang Runfan, Hredzak B., Morstyn T. Distributed control with virtual capacitance for the voltage restorations state of charge balancing and load allocations of heterogeneous energy storages in a DC datacenter microgrid. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2019;34(3):1296-1308. <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2889065>.

33. Unamuno E., Barrena J.A. Equivalence of primary control strategies for AC and DC microgrids. *Energies*. 2017;10(1):91. <https://doi.org/10.3390/en10010091>.
34. Huang Linbin, Xin Huanhai, Wang Zhen, Wu Kuayu, Wang Haijiao, Jiabing Hu, et al. A virtual synchronous control for voltage-source converters utilizing dynamics of DC-link capacitor to realize self-synchronization. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2017;5(4):1565-1577. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2017.2740424>.
35. Peng Qiao, Yang Yongheng, Liu Tianqi, Blaabjerg F. Coordination of virtual inertia control and frequency damping in PV systems for optimal frequency support. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*. 2020;5(4):305-316. <https://doi.org/10.24295/CPSSTPEA.2020.00025>.
36. Arani M.F.M., Mohamed Ya.A.-R.I. Analysis and impacts of implementing droop control in DFIG-based wind turbines on microgrid/weak-grid stability. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2015;30(1):385-396. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2321287>.
37. Hafiz F., Abdenour A. Optimal use of kinetic energy for the inertial support from variable speed wind turbines. *Renewable Energy*. 2015;80:629-643. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.051>.
38. Li Dongdong, Zhu Qianwei, Lin Shunfu, Bian Xiaoyan. A self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2017;32(1):397-398. <https://doi.org/10.1109/TEC.2016.2623982>.
39. Liu Ju, Yang Dongjun, Yao Wei, Fang Rengcun, Zhao Hongsheng, Wang Bo. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system. *Protection and Control of Modern Power Systems*. 2017;2(4):429-437. <https://doi.org/10.1186/s41601-017-0070-0>.
40. Yang Li, Hu Zhijian, Xie Shiwei, Kong Shunfei, Lin Weiwei. Adjustable virtual inertia control of supercapacitors in PV-based AC microgrid cluster. *Electric Power Systems Research*. 2019;173:71-85. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.04.011>.
41. Fang Jingyang, Tang Yi, Li Hongchang, Li Xiaoqiang. A battery ultracapacitor hybrid energy storage system for implementing the power management of virtual synchronous generators. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018;33(4):2820-2824. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2759256>.
42. Hazra S., Bhattacharya S. Hybrid energy storage system comprising of battery and ultra-capacitor for smoothing of oscillating wave energy. In: *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. 2016. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7855172>.
43. Fang Jingyang, Yi Tang, Li Hongchang, Li Xiaoqiang. A battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for implementing the power management of virtual synchronous generators. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018;33(4):2820-2824. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2759256>.
44. Vassilakis A., Kotsampopoulos P., Hatziaargyriou N., Karapanos V. A battery energy storage based virtual synchronous generator. In: *IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control - IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid*. 2013. <https://doi.org/10.1109/IREP.2013.6629425>.
45. Huiyu Miao, Chenyu Zhang, Fei Mei, Yun Yang, Jianyong Zheng. A novel control strategy for hybrid energy system in virtual synchronous generator. In: *13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. 31 May – 2 June 2018, Wuhan. Wuhan: IEEE; 2018, p. 2244-2249. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2018.8398083>.
46. Zhang Qiao, Wang Lijia, Li Gang, Liu Yan. A real-time energy management control strategy for battery and supercapacitor hybrid energy storage systems of pure electric vehicles. *Journal of Energy Storage*. 2020;31:101721. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101721>.
47. Xincheng Zhao, Wang Xincheng, Ke Wang. Research for virtual synchronous generator with considering energy storage system. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;486:012048. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/486/1/012048>.
48. Fang Jingyang, Tang Yi, Li Hongchang, Li Xiaoqiang. A battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for implementing the power management of virtual synchronous generators. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018;33(4):2820-2824. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2759256>.
49. Shi Mingming, Chen Hongfei, Zhang Chenyu, Mei Fei, Fang Jicheng, Miao Huiyu. A virtual synchronous generator system control method with battery SOC feedback. In: *2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration*. 2018. <https://doi.org/10.1109/EI2.2018.8582563>.
50. Wang Ruiming, Qin Shiyao, Bao Weiyu, Hou Anxiang, Ying You, Ding Lei. Configuration and control strategy for an integrated system of wind turbine generator and supercapacitor to provide frequency support. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2023;154:109456. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109456>.
51. Udalov S.N., Achitaev A.A., Pristup A.G., Bochenkov B.M., Pankratz Yu., Tarbill R.D. Increasing the regulating ability of a wind turbine in a local power system using magnetic continuous variable transmission. *Wind Engineering*. 2018;42(5):411-435. <https://doi.org/10.1177/0309524X18780404>. EDN: YBTTNB.
52. Udalov S.N., Achitaev A.A., Pristup A.G., Bochenkov B.M. Increase of dynamic stability stoke of autonomous energy system based on wind energy installations under sudden load change. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2016;327(8):89-98. EDN: RSYLYW.
53. Udalov S.N., Pristup A.G., Achitaev A.A. Research of magnetic transmission with variable gear ratio in a wind-driven generator for improving dynamic stability stoke. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2015;326(10):123-134. EDN: VOQZHB.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Идрисов Азат Рафисович,
аспирант,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
a.idrisov23@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3707-9122>

Ачитаев Андрей Александрович,
к.т.н., доцент,
заместитель директора по научной работе,
Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального
университета,
655619, г. Саяногорск, рп. Черёмушки, 46, Россия
✉ achitaevaa@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3225-2558>

Вклад авторов

Идрисов А.Р. занимался анализом исследований, публикаций. Ачитаев А.А. проводил исследование и осуществлял подбор публикаций для обзора.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 10.10.2023 г.; одобрена после рецензирования 24.02.2024 г.; принята к публикации 25.02.2024 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Azat R. Idrisov,
Postgraduate Student,
Ural Federal University named after the First President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
a.idrisov23@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3707-9122>

Andrey A. Achitaev,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Deputy Director for Research,
Sayano-Shushensky branch of the Siberian Federal
University,
46, Cheremushki settlement, Sayanogorsk 655619,
Russia
✉ achitaevaa@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3225-2558>

Contribution of the authors

Idrisov A.R. was engaged in the analysis of researches and literature review. Achitaev A.A. carried on the research and selected publications for the review.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 10.10.2023; approved after reviewing 24.02.2024; accepted for publication 25.02.2024.

Original article

EDN: PHOEXF

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-111-123

POWER ENGINEERING



Neural network fusion optimization for photovoltaic power forecasting

Song Liu¹, Karthik S. Parihar², Mukesh K. Pathak³, Denis N. Sidorov⁴✉^{1,4}*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*⁴*Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia*^{2,3}*Indian institute of Technology Roorkee, Roorkee Uttaranchal, India*

Abstract. This paper aims to establish a comprehensive photovoltaic power generation prediction model. By collecting photovoltaic power generation data and weather data for a year, we analyzed the photovoltaic output characteristics in different seasons and found that the output characteristics in different seasons are also different. This article uses three neural network models, Long Short Term Memory Network, Recurrent Neural Network, and Dense Neural Network, to analyze the output characteristics of different seasons. Training, prediction, and prediction error analysis found that different models have different prediction accuracy in different seasons. Therefore, this paper proposes a weighted ensemble model add weights model based on the Nelder-Mead method to train and predict different seasons respectively. By analyzing the prediction error, the prediction accuracy needs to be better than a single model. We add noise to the data set to simulate unstable lighting conditions such as rainy days, and train and predict the data set after adding noise. The prediction results show that the comprehensive model has higher prediction accuracy than a single model in extreme weather. In order to verify the reliability of the model, this article uses a sliding window to extract the confidence interval of the prediction results, and uses the Bootstrap method to calculate the confidence interval. By analyzing and comparing each model's Average Coverage, Root Mean Squared Length, and Mean Width, the prediction accuracy and reliability of add weights model are better than those of a single model.

Keywords: photovoltaic power forecast, long short term memory, recurrent neural network, dense neural network, Nelder-Mead method

Funding: The work was funded by a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project no. 075-15-2022-1215).

For citation: Liu Song, Parihar K.S., Pathak M.K., Sidorov D.N. Neural network fusion optimization for photovoltaic power forecasting. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):111-123. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-111-123>. EDN: PHOEXF.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.311

Оптимизация объединения нейронных сетей для прогнозирования фотоэлектрической энергии

Сун Лю¹, К.С. Парихар², М.К. Патхак³, Д.Н. Сидоров⁴✉^{1,4}*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*⁴*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия*^{2,3}*Индийский технологический институт Рурки, г. Рурки Уттаранчал, Индия*

Резюме. Целью является проведение исследований в области прогнозирования выработки солнечных электростанций. В качестве объекта исследования предложена ансамблевая нейросетевая прогнозная модель ADWM на основе взвешенных нейронных сетей: сети долгой краткосрочной памяти LSTM, рекуррентной нейронной сети RNN и полносвязной нейронной сети DNN. При этом для поиска оптимальных весов использован метод безусловной оптимизации Нелдера-Мида для получения лучшей предсказательной эффективности прогнозной модели. С целью валидации предложенной прогнозной модели использованы реальные данные о выработке солнечных электростанций на основе фотоэлектрических панелей и метеорологические данные из Австралии за период – один год. Для имитации условий неустойчивой низкой инсоляции использована аугментация данных, добавление шума к набору данных. Анализ прогнозных моделей на реальных временных рядах показал, что в разные сезоны как данные выработки, так и наиболее значимые признаки существенно различаются. Установлено, что точность прогнозирования разных нейросетевых моделей в различные сезоны может существенно варьироваться. Резуль-

таты прогнозирования показывают, что предложенная комплексная модель имеет более высокую точность прогнозирования, чем отдельные модели в экстремальных погодных условиях. Для проверки надежности предложенной модели использовано скользящее окно для извлечения доверительного интервала и метод Bootstrap для расчета доверительного интервала. Таким образом, экспериментальным путем установлено, что точность и надежность прогнозирования комплексированной прогнозной нейросетевой модели ADWM выше, чем у традиционных нейросетевых моделей. Проведенные исследования позволяют более эффективно использовать углеродно-нейтральные источники фотоэлектрической энергии и планировать работу энергосистем с распределенной генерацией.

Ключевые слова: прогноз мощности фотоэлектрических систем, нейросеть долгой краткосрочной памяти, рекуррентная нейросеть, полносвязная нейросеть, метод Нелдера-Мида

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2022-1215).

Для цитирования: Лю Сун, Парихар К.С., Патхак М.К., Сидоров Д.Н. Оптимизация объединения нейронных сетей для прогнозирования фотоэлектрической энергии // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С 111–123. (In Eng.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-111-123>. EDN: PHOEXF.

INTRODUCTION

As the global demand for renewable energy continues to grow, photovoltaic energy has emerged as one of the cleanest and most sustainable energy sources [1]. However, the characteristics of photovoltaic power generation, such as weather changes and day-night cycles, make its output highly unstable and seasonal, posing challenges to the reliable operation and energy management of the power system [2, 3]. Therefore, accurate prediction of photovoltaic power becomes a crucial task aimed at maximizing the efficiency, sustainability, and economy of the power system [4]. In current research on PV power forecasting, the prediction methods can be categorized into three types: based on physical models, based on statistical models, and based on machine learning [5]. The physical model primarily models the irradiance and photovoltaic inverter based on the characteristics of photovoltaic power generation and makes predictions using real-time data. While the physical model can offer a certain level of accuracy, the prediction system is relatively complex [6]. The statistical model is built on historical data and statistical analysis. By observing and analyzing the time series data of the photovoltaic system power output, a statistical model has been developed to predict future changes in power. Compared to physical models, statistical models are less complex, but the prediction results heavily rely on the quality of historical data [7]. Machine learning models train algorithms to identify patterns in data and then utilize those patterns to make predictions. For predicting PV power, machine learning models can utilize various algorithms, including neural networks, support vector machines, and decision trees. These models are capable of adapting to complex nonlinear relationships in order to better capture the intricate changes in photovoltaic

system power output [8]. In the field of photovoltaic (PV) power forecasting, neural network models have proven to be a powerful tool capable of capturing complex nonlinear relationships and temporal dependencies, thus performing well in time series forecasting. However, a single neural network model still faces several challenges, such as model complexity, data diversity, overfitting, and other issues. A single model may not effectively adapt to the prediction requirements of various climate types in different regions. In the paper [9], the author utilizes the T-S (Takagi-Sugen) fuzzy model and the deep belief network (DBN) for making predictions. Finally, a genetic algorithm is employed to optimize the model weights, resulting in a much smaller prediction error compared to that of a single model. Paper [10] proposed a prediction method based on long short term memory LSTM-ATTENTION. Compared to a single LSTM, the prediction accuracy has improved, but the model's generalization ability and stability have not been verified. In the paper [11], the author employs a fusion model of DCNN and LSTM neural network, fully leveraging the data mining capabilities of DCNN, and achieves promising results in short-term photovoltaic power prediction. Paper [12] uses backpropagation (BP) neural network to assign weight coefficients to the gray model and improve gray models.

In Paper [13], the author categorized the day-ahead weather into different types by hour. They combined this information with historical weather forecast data, trained separate datasets for each weather type, and divided the yearly data into four seasons based on the seasons. For training and prediction in each season, the author compared the prediction results of four models such as LSTMNN and recurrent neural network (RNN), but did not assess the prediction performance of different models across different seasons.

Although the prediction results of LSTMNN are better than those of other models, the data used for prediction are all from one season, which limits the ability to verify the adaptability of the model. In this paper, we divide the data into four parts by season and use different models to train and predict different seasons.

In the aforementioned papers, single and combined neural networks were utilized to construct models for prediction. This study proposes an integrated model consisting of three neural networks: LSTM (long short-term memory network), RNN, and dense neural network (DNN), to enhance the accuracy and reliability of photovoltaic power prediction [14].

The main objective of this study is to develop an ensemble method that combines multiple neural network models to enhance PV power predictions by fully leveraging the strengths of each model. Specifically, we will explore various types of neural network models, including LSTM, RNN, and DNN. By assigning weights to each model, we will then utilize the Nelder-Mead method to optimize the weights and ultimately achieve the optimal weighted model. In deep learning prediction models, the selection of hyperparameters significantly affects the accuracy of the predictions. In current research, the

primary methods for hyperparameter optimization include Bayesian optimization, random search optimization, and other approaches. In the paper [15], the author compared the performance of various hyperparameter optimization methods in neural networks and concluded that the Nelder-Mead method yields better optimization results and is simpler than Bayesian optimization. The significance of this research lies in its potential to assist power system operators, energy companies, and government agencies in enhancing the planning and management of photovoltaic energy usage. This can lead to a reduction in the challenges posed by instability, as well as an improvement in system reliability and sustainability. In addition, the model exhibits good adaptability, allowing for the adjustment of weights based on the model's error to minimize output prediction errors.

INTEGRATED MODEL FRAMEWORK

The structure of the photovoltaic power prediction model in this article is shown Fig.1. The combined model comprises four components: an LSTM photovoltaic power prediction model, an RNN photovoltaic power prediction model, a DNN photovoltaic power prediction model, Nelder-Mead weight optimization, and a combined prediction model.

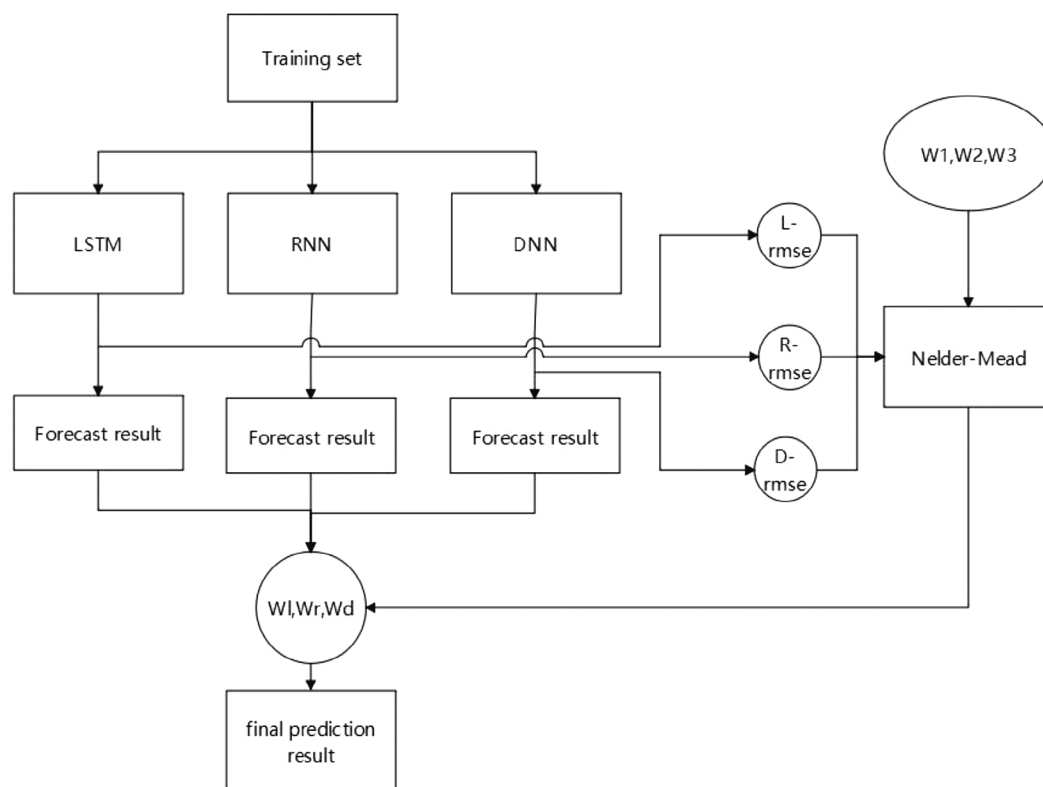


Fig. 1. Framework diagram of the prediction model
Рис. 1. Структурная схема модели прогнозирования

LONG SHORT TERM MEMORY

LSTM neural network model is an improved RNN [16]. It uses memory cells to save historical information at the previous moment, and selectively remembers or forgets historical information through forgetting gates, solving the gradient explosion and gradient disappearance problems of RNN shortcomings. So it is suitable for long-term series forecasting problems. The computing nodes of the LSTM model include input gate, output gate, forget gate and memory cell. Among them, the input, output, and forgetting gates are the key to controlling information. The forgetting gate is used to filter the information that needs to be remembered, and the Cell is used to update the current state. The x_t of the input gate controls the storage vector in the memory unit after passing through the activation functions σ and $\tanh$, where x_t is the photovoltaic power input vector. The forgetting part of the memory unit is determined by x_t and the intermediate output h_{t-1} of the previous moment. The intermediate output h_t is determined by the updated S_t , the calculation method is as follows:

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f); \quad (1)$$

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i); \quad (2)$$

$$h_t = o_t \cdot \tanh(C_t); \quad (3)$$

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o); \quad (4)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C); \quad (5)$$

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \tilde{C}_t. \quad (6)$$

There: y_t is forget gate, o_t and h_t are output gate, i_t and C_t are input gate, C_t is cell state.

The predicted value of the final output layer is:
 $y_t = \sigma(W_y \cdot h_t + b_y)$.

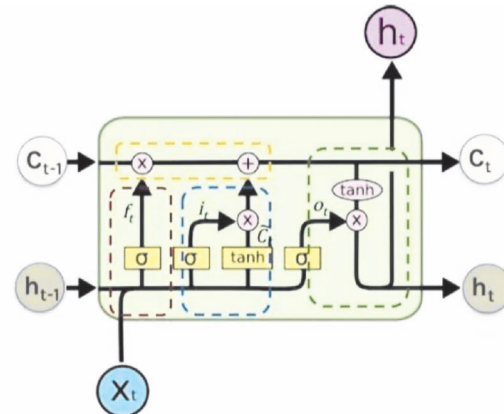


Fig. 2. Long short term memory
 Рис. 2. Долгая краткосрочная память

RECURRENT NEURAL NETWORK

Recurrent Neural Network is a type of neural network designed to handle sequential data [17]. The device has memory capabilities and can capture temporal dependencies in sequence data. The core concept of RNN is that when processing the current input sample, the hidden state from the previous time step can be utilized to incorporate historical information into the model. The structure of an RNN is relatively simple and mainly consists of an input layer, a hidden layer, and an output layer. The input year receives sequence data, the hidden layer calculates the current input and the hidden state from the previous moment, and the output layer produces the result. The advantage of RNN is that it can handle variable-length sequences, possesses memory capabilities, and can capture long-term dependencies in sequence data.

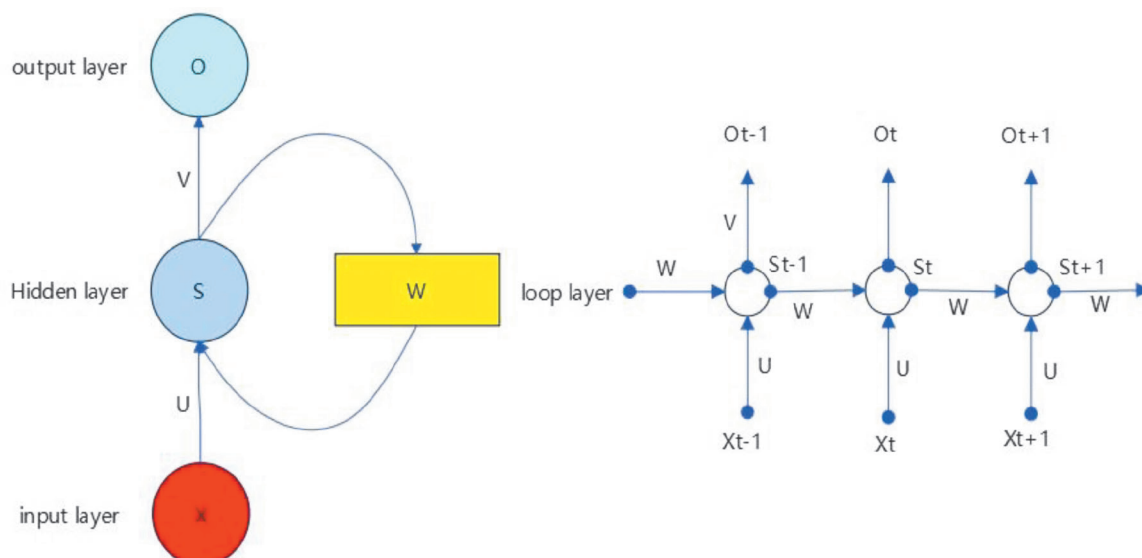


Fig. 3. Recurrent neural network
 Рис. 3. Рекуррентная нейронная сеть

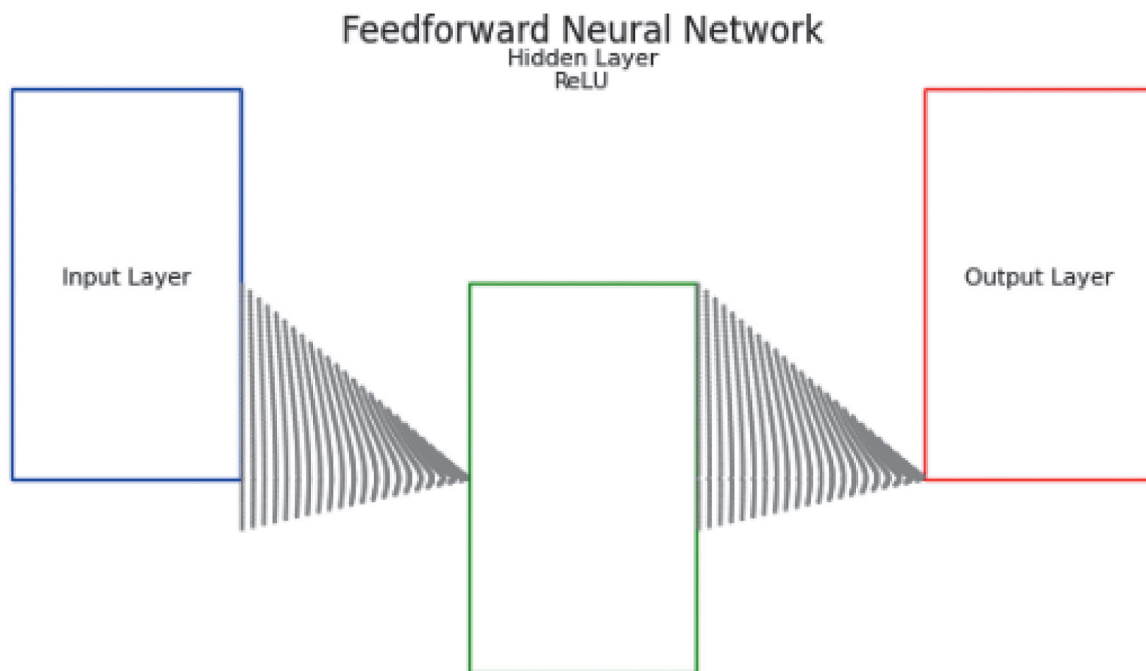


Fig. 4. Dense neural network
 Рис. 4. Полносвязная нейронная сеть

Here, X represents the input, which generates S through a weight matrix U , and S generates O through a weight matrix V . The key distinction between RNN and traditional neural networks is that each time the previous output is brought to the next hidden layer and trained together. U represents the weight matrix from the input layer to the hidden layer, O is a vector representing the value of the output layer, and V is the weight matrix from the hidden layer to the output layer.

$$h_t = f(U_{xt} + W_{st-1} + b); \quad (7)$$

$$y_t = \text{softmax}(V_{st} + c). \quad (8)$$

DENSE NEURAL NETWORK

In this paper, we constructed a basic feedforward neural network [18]. The model includes a hidden layer with 64 neurons and a ReLU activation function, as well as an output layer without an activation function. The model uses the Adam optimizer with a learning rate of 0,001 and the mean square error as the loss function. The model is trained with 64 samples per batch for 50 training epochs.

ADD WEIGHTS MODEL

In this paper, we employ the Nelder-Mead method to optimize the weight of each model based on the prediction error of a single model, and subsequently integrate the weighted

prediction results into a single prediction outcome. The process is as follows. First, we input the processed dataset into three models for training and prediction. We obtain the prediction error of each model, randomly set a weight combination W , and tune the model group based on the error to obtain the best weight combination, $W1$. This weight combination is then added to the prediction result to obtain the best overall prediction result. The Nelder-Mead method is a gradient-free optimization algorithm that is appropriate for situations where the objective function is not smooth or differentiable. It finds the minimum of a function by conducting a local search on simplices in the search space.

The specific process is depicted in Fig. 5.

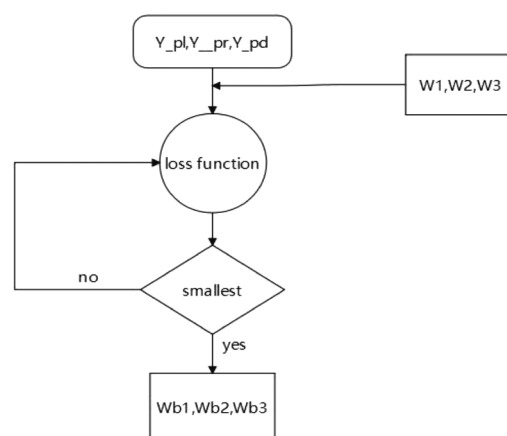


Fig. 5. Nelder-Mead
 Рис. 5. Нельдер-Мид

$$Loss = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \omega_1 \times y_{pli} - \omega_2 \times y_{pri} - \omega_3 \times y_{pdi}) \quad (9)$$

Here y_i are the true values, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ are the initial weight of each model, $y_{pli}, y_{pri}, y_{pdi}$ are the predicted values of each model.

RESEARCH METHODS

This paper analyzes the photovoltaic power generation data from a power station in Australia over the course of one year. Data is collected every 5 minutes, including actual power, wind speed, horizontal irradiance, diffuse irradiance, temperature, and other environmental factors. First, we preprocess the data by addressing data outliers and missing values. We analyze the data using a box plot and observe that the output power is not 0 during non-sunrise hours

(22-6 o'clock), and there is a very small output. Ideally, we set these nonzero values to 0. Since there are still missing values in the data, this article employs spline interpolation to fill in the missing values. After completing the above operations, we normalize and standardize the data to make it suitable for model training, therefore, the power in the prediction result graphs in this paper is the normalized power. Given the multitude of meteorological features, it is necessary to engage in feature engineering in order to perform correlation analysis on the features, identify those with high correlation, and analyze the heat map based on the correlation analysis of the data. As shown in Fig. 6. It can be observed that the correlation between radiance and output power is 0,98, the correlation of temperature is 0,46, and the correlation of wind speed is 0,16.

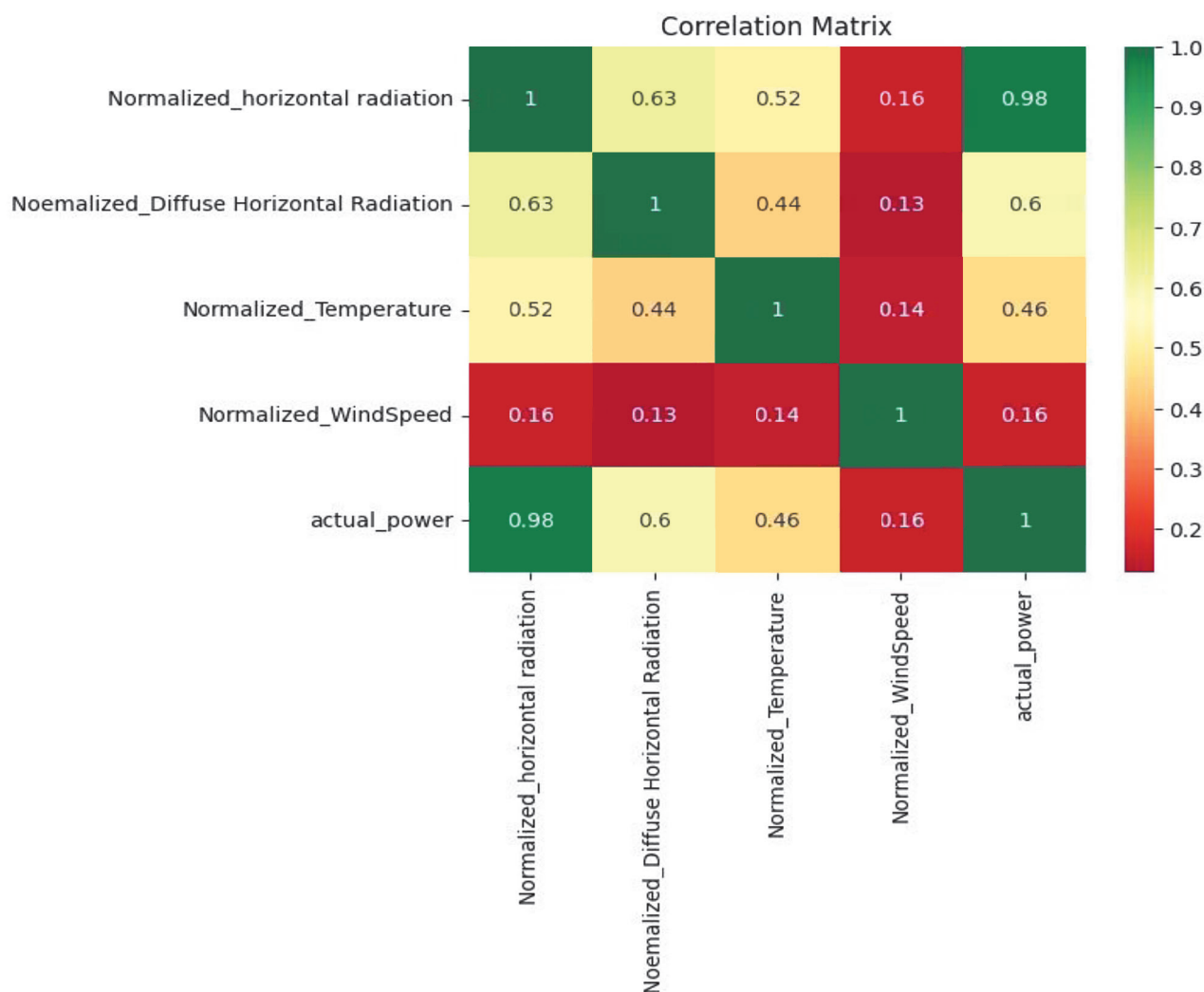


Fig. 6. Correlation heat map

Рис. 6. Корреляционная тепловая карта

In this paper, the two characteristics selected for analysis are radiance and temperature. To assess the performance of each model across different seasons, we segmented the data into four seasons—spring, summer, autumn, and winter—based on the seasonal dates in Australia. Subsequently, we conducted separate training and testing for each model. This study aimed to analyze the climate characteristics and output power variations across different seasons. The data for one year was divided into four seasons, and output power curves and box plots were created for each season. We can observe from Fig. 7 that power fluctuates in different seasons. The Fig. 7 shows that fluctuations are more frequent in winter and summer, and relatively stable in spring and autumn. Therefore, the prediction accuracy of a single model will vary for each season. This paper uses three common neural network models as the base model, which improves the adaptability of the model and can play their best advantages in response to different seasons.

Since each model exhibits varying prediction performance across different seasons, we train predictions for each season separately using each model. We train the data of each season

separately, and use the last day of each season as the test set, 80% of the remaining data as the training set, and 20% as the validation set. By analyzing the output power characteristics of each season, we can observe that the fluctuations in output power vary across seasons due to distinct seasonal characteristics. Therefore, if only a single model is used for power prediction, this will reduce the accuracy of the model's predictions.

HYPERPARAMETER OPTIMIZATION

In this paper, we use the random search method to optimize the hyperparameters of the three neural networks used in this paper. The search space sets the learning rate to 0, 0.001, 0.01, 0.1. Batch size is 32, 64, 128. Epochs are 50, 100, and 200. During the random search process, we evaluate and compare the performance of each set of hyperparameters based on the cross-validation evaluation index RMSE, and finally select the hyperparameter combination with the best performance. This method can more efficiently find the optimal solution in a large number of hyperparameter combinations, and has a certain degree of randomness, which helps avoid falling into a local optimal solution.

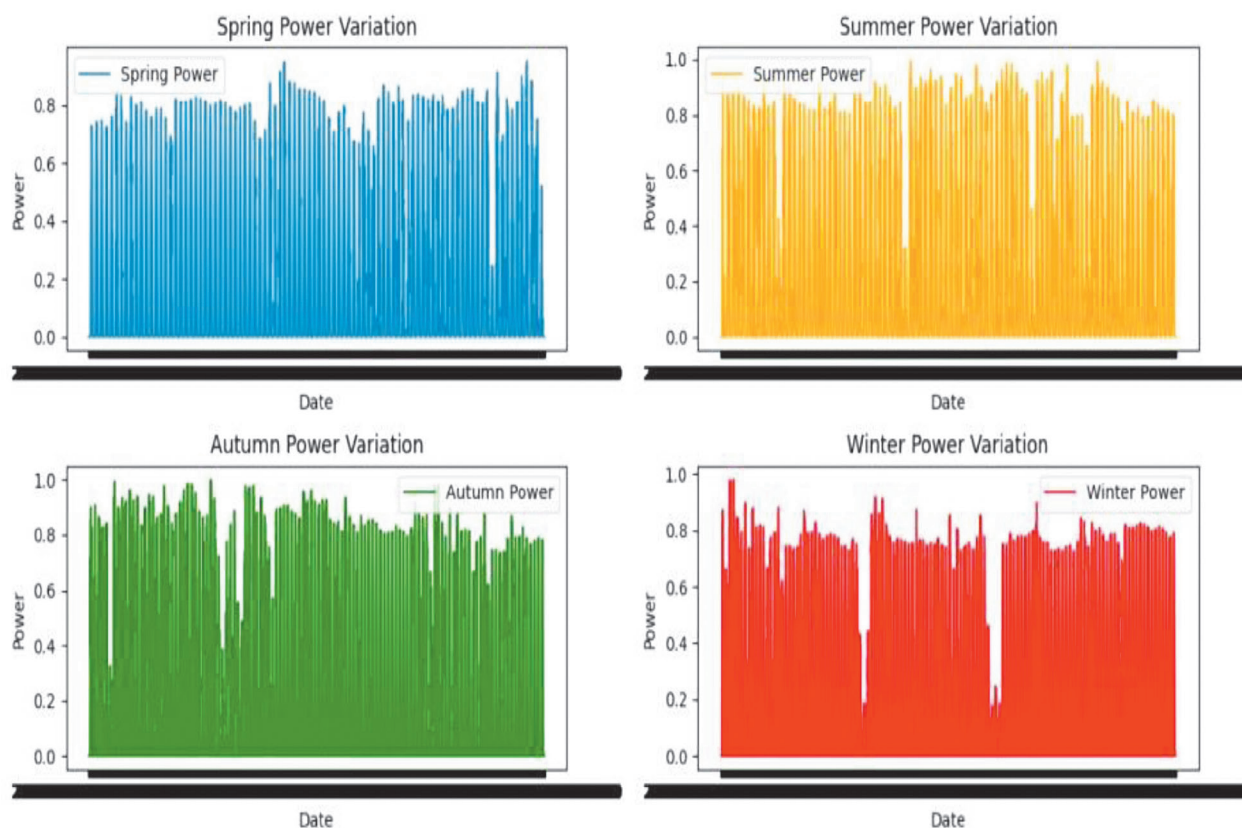


Fig. 7. Power fluctuations in different seasons
Рис. 7. Колебания мощности в разные времена года

MODEL EVALUATION AND RESULT ANALYSIS

When evaluating and estimating prediction error, the mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE) are used. Additionally, the coefficient of determination (R-squared, R2) is used to assess the accuracy of the model's predictions [19]. The calculation formula for each evaluation index is as follows:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|; \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}; \quad (11)$$

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right|. \quad (12)$$

By weighting the model's prediction results, we obtain the evaluation criteria and prediction map for each model. We select the preprocessed summer data set for training and prediction. The time point interval of the data set is 5 minutes. From the final prediction result, as shown in Fig. 8, it can be observed that the prediction accuracy of the model improved after optimization was added, surpassing that of the single model. This study achieved improved prediction results by incorporating weights from three simple models, surpassing the performance of a single model. The main advantage of this integrated model is its ability to adjust the weights as the region and environment change, resulting in higher prediction accuracy. Compared with a single model, it demonstrates better adaptability. Through the prediction results, as shown in Table 1, we observed that the LSTM model has the best predictive accuracy among the single models. After analyzing the weighted output prediction

results, as shown in Table 2, we found that all error indicators decreased. This indicates that the model has advantages over a single model.

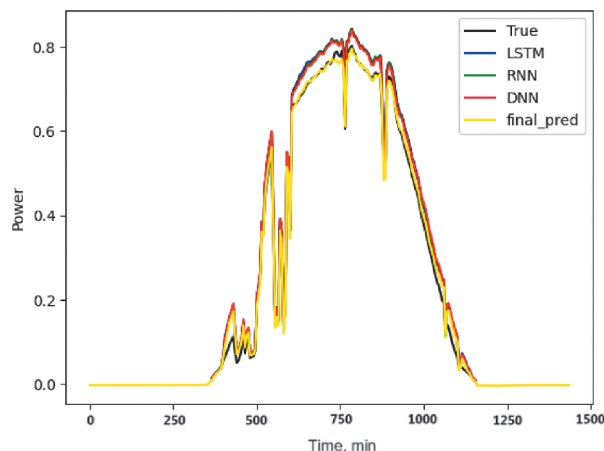


Fig. 8. Forecast results

Рис. 8. Результаты прогноза

CONFIDENCE INTERVAL COMPARISON

In this paper, we calculated three confidence interval indicators using the Bootstrap method: average coverage, Root Mean Squared Length (RMSL), and Mean Width [20]. Use a sliding time window with a window size of 15 to calculate the confidence intervals for various time periods. By iterating through the sliding window, data within each window is intercepted for prediction and confidence interval calculation. And plotted the confidence interval for each model, as shown in Fig. 9–12.

$$\text{Coverage} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Indicator}(L_i \leq y_i \leq U_i); \quad (13)$$

$$\text{MeanWidth} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - L_i); \quad (14)$$

$$\text{RMSL} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - L_i)^2}. \quad (15)$$

Table 1. Forecast errors of various models in different seasons

Таблица 1. Ошибки прогноза различных моделей в разные времена года

RMSE	RNN	LSTM	DNN
spring	0.030859	0.032103	0.031261
summer	0.022935	0.020825	0.021334
autumn	0.020222	0.022085	0.021396
winter	0.019157	0.021151	0.019446

Table 2. Forecast results

Таблица 2. Результаты прогноза

Modal	MAE	RMSE	MAPE
LSTM'	0.01591	0.02549	11.18%
RNN	0.01859	0.03074	12.55%
DNN	0.02036	0.03423	13.88%
ADWM	0.00786	0.02307	8.38%

There: U_i is the upper bound of the i -th sample, L_i is the lower bound of the i -th sample, y_i is the actual observed value.

From Fig. 9–12, we can see the confidence intervals for each model. We assessed the accuracy of the confidence intervals for each model by calculating the average coverage. The average coverage reflects the frequency with which the actual observations fall within their respective confidence intervals. A higher average coverage indicates that the model's uncertainty estimation is more accurate and reliable. From the calculation results, it is found that the average coverage of the integrated model (ADWM) is 60% higher than that of other models, which confirms that the prediction accuracy of the integrated model is superior to that of a single model. By calculating the Root Mean Squared Length, we can assess the length of the confidence

interval, which represents the level of uncertainty surrounding the predicted results. The root mean square length of ADWM is 0.157346, which is smaller than that of a single model. This indicates that the confidence interval of the ADWM model is relatively compact, reflecting a more accurate estimate of the predicted value. Through the Mean Width measure, we analyze the average uncertainty of the model across the entire forecast horizon. The average width of ADWM is 0.148075, which is smaller than that of a single model. A model with a larger average width may indicate higher prediction uncertainty during certain periods or conditions. The reliability of the model in this paper is confirmed by the accuracy of the prediction results. The prediction accuracy of the mixed model is higher. The prediction results after adding weights (refer to Table 3) show that all indicators outperform those of the single model.

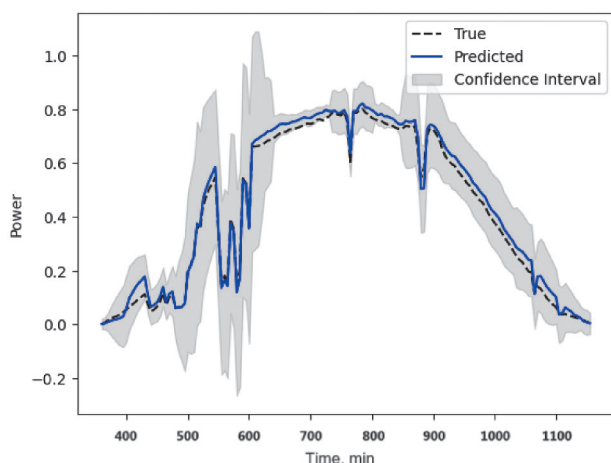


Fig. 9. Results for long short term memory
Рис. 9. Результаты применения ИНС долгой краткосрочной памяти

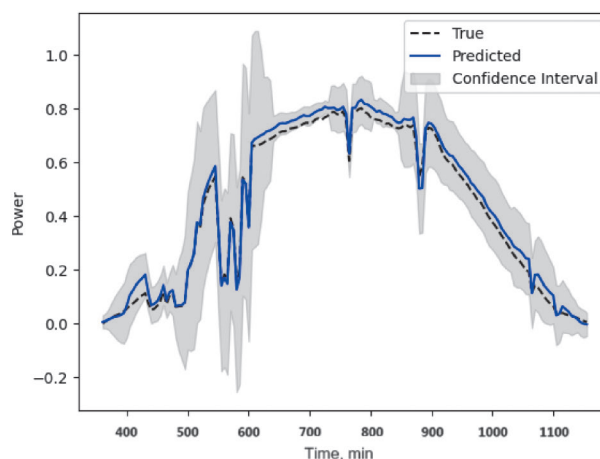


Fig. 10. Dense neural network
Рис. 10. Результаты применения полносвязной нейронной сети

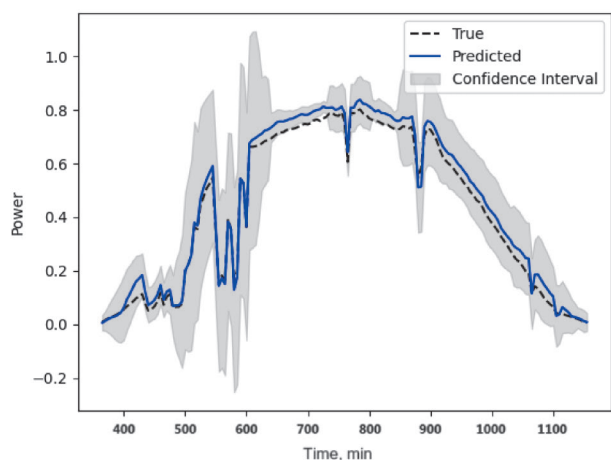


Fig. 11. Recurrent neural network
Рис. 11. Рекуррентная нейронная сеть

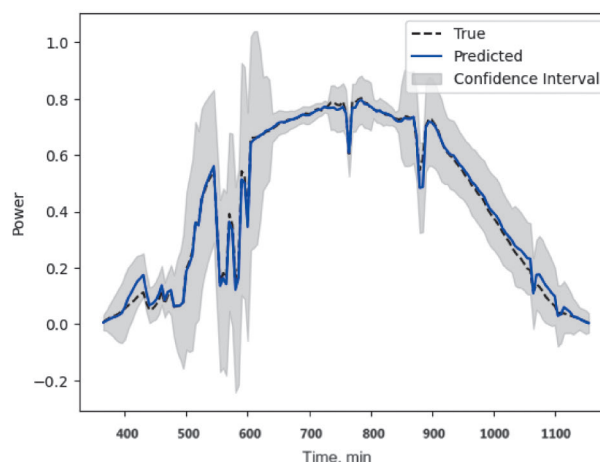
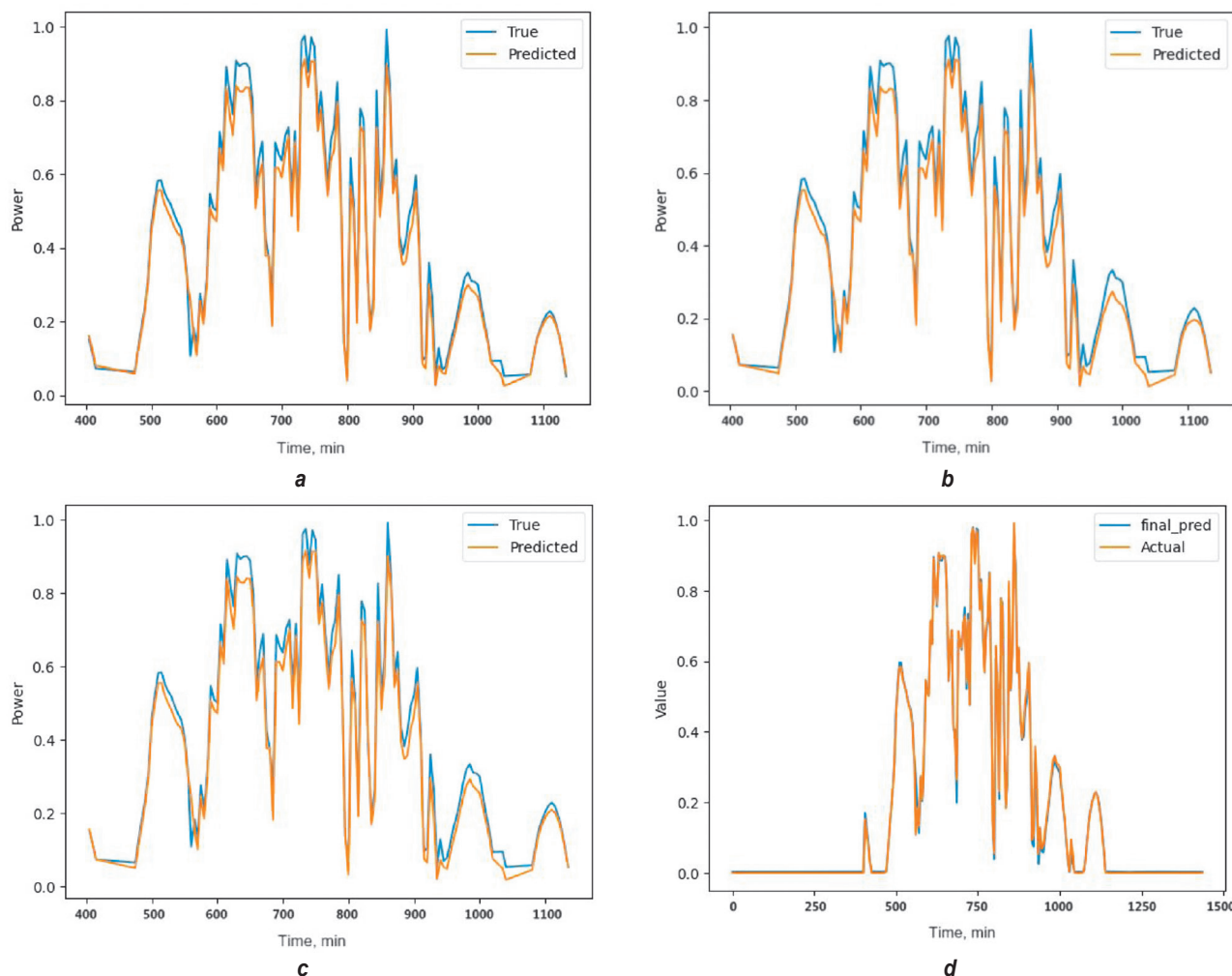


Fig. 12. Add weights model
Рис. 12. Модель добавления весов

Table 3. Confidence interval**Таблица 3.** Доверительный интервал

	LSTM	DNN	RNN	ADWM
Average Coverage	0.57986	0.59375	0.55556	0.600694
Average Root Mean Squared Length	0.16396	0.16417	0.16513	0.157346
Average Mean Width	0.15408	0.15432	0.15533	0.148075

**Fig. 13.** Rainy day forecast results: a – DNN-R; b – RNN-R; c – LSTM-R; d – ADWM-R**Рис. 13.** Результаты прогноза дождливого дня: а – DNN-R; b – RNN-R; c – LSTM-R; d – ADWM-R

MODEL VALIDATION

To assess the model's stability in extreme rainy weather, we utilized a dataset specifically focused on rainy weather conditions for training and testing. The prediction results are shown in

Fig. 13. From the prediction results (Table 4), we can observe that in rainy weather, the prediction error is larger. However, the model proposed in this article demonstrates better prediction results than a single model.

Table 4. Rainy weather forecast results**Таблица 4.** Результаты прогноза дождливой погоды

Modal	MAE	RMSE	MAPE
LSTM	0.01836	0.02923	12.43%
RNN	0.02085	0.03188	13.40%
DNN	0.01801	0.02784	10.11%
ADWM	0.00771	0.02294	6.81%

CONCLUSION

This paper proposes a neural network based on three types of recurrent neural networks: LSTM, RNN, and DNN. It performs weighted optimization on the prediction results, utilizes the Nelder-Mead method to optimize its weights, and outputs the optimized prediction results. According to the experimental data, we can conclude that the integrated model proposed in this paper exhibits higher prediction accuracy and better stability

compared to a single model. Due to the variability of the weights, it adapts to the forecasting needs of different regions in different seasons. This article has confirmed that optimizing weights using the Nelder-Mead method can improve the prediction accuracy of the model and enhance its stability. However, it does not delve into the hyperparameter tuning method for a single model, so the output results will be more accurate after hyperparameter tuning.

References

1. Qazi A., Hussain F., Rahim N.A.B.D., Hardaker G., Alghazzawi D., Shaban K., et al. Towards sustainable energy: a systematic review of renewable energy sources, technologies, and public opinions. *IEEE Access*. 2019;7:63837-63851. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906402>.
2. Hassan Q., Algburi S., Sameen A.Z., Salman H.M., Jaszczur M. A review of hybrid renewable energy systems: solar and wind-powered solutions: challenges, opportunities, and policy implications. *Results in Engineering*. 2023;20:101621. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621>.
3. Said D. Intelligent photovoltaic power forecasting methods for a sustainable electricity market of smart micro-grid. *IEEE Communications Magazine*. 2021;59(7):122-128. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2001140>.
4. Li Qing, Zhang Xinyan, Ma Tianjiao, Jiao Chunlei, Wang Heng, Hu Wei. A multi-step ahead photovoltaic power prediction model based on similar day, enhanced colliding bodies optimization, variational mode decomposition, and deep extreme learning machine. *Energy*. 2021;224:120094. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120094>.
5. Wang Kejun, Qi Xiaoxia, Liu Hongda. A comparison of day-ahead photovoltaic power forecasting models based on deep learning neural network. *Applied Energy*. 2019;251:113315. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113315>.
6. Mayer M.J., Gróf G. Extensive comparison of physical models for photovoltaic power forecasting. *Applied Energy*. 2021;283:116239. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116239>.
7. De Giorgi M.G., Congedo P.M., Malvoni M. Photovoltaic power forecasting using statistical methods: impact of weather data. *IET Science, Measurement & Technology*. 2014;8:90-97. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2013.0135>.
8. Markovics D., Mayer M.J. Comparison of machine learning methods for photovoltaic power forecasting based on numerical weather prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;161:112364. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112364>.
9. Liu Ling, Liu Fang, Zheng Yuling. A novel ultra-short-term pv power forecasting method based on DBN-based Takagi-Sugeno fuzzy model. *Energies*. 2021;14(20):6447. <https://doi.org/10.3390/en14206447>.
10. Tai Bin, Yu Lei, Huang Yangjue, Wang Jinfeng, Wang Yin, Zhu Yuanzhe, et al. Power prediction of photovoltaic power generation based on LSTM model with additive attention mechanism. In: *7th International Conference on Smart Grid and Smart Cities*. 22–24 September 2023, Lanzhou. Lanzhou; 2023, p. 474-480. <https://doi.org/10.1109/ICGSC59580.2023.10319231>.
11. Wang X., Zhou X., Xing J., Yang J. A prediction method of PV output power based on the combination of improved grey back propagation neural network. *Journal of Solar Energy*. 2021;7:81-87. <https://doi.org/10.7667/PSPC151675>.
12. Liu Fang, Li Ranran, Li Yong, Yan Ruifeng, Saha Tapan. Takagi–Sugeno fuzzy model-based approach considering multiple weather factors for the photovoltaic power short-term forecasting. *IET Renewable Power Generation*. 2017;11:1281-1287. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.1036>.
13. Hossain M.S., Mahmood H. Short-term photovoltaic power forecasting using an LSTM neural network and synthetic weather forecast. *IEEE Access*. 2020;8:172524-172533. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3024901>.
14. Dolara A., Grimaccia F., Leva S., Mussetta M., Ogliari E. Comparison of training approaches for photovoltaic forecasts by means of machine learning. *Applied Sciences*. 2018;8(2):228. <https://doi.org/10.3390/app8020228>.
15. Ozaki Yo., Yano M., Onishi M. Effective hyperparameter optimization using Nelder-Mead method in deep learning. *IPSC Transactions on Computer Vision and Applications*. 2017;9(20):1-12. <https://doi.org/10.1186/s41074-017-0030-7>.
16. Sherstinsky A. Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2020;404:132306. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2019.132306>.
17. Muhuri P.S., Chatterjee P., Yuan Xiaohong, Roy K., Esterline A. Using a long short-term memory recurrent neural network (LSTM-RNN) to classify network attacks. *Information*. 2020;11(5):243. <https://doi.org/10.3390/info11050243>.
18. Lee Donghun, Kim Kwanho. Recurrent neural network-based hourly prediction of photovoltaic power output using meteorological information. *Energies*. 2019;12(2):215. <https://doi.org/10.3390/en12020215>.
19. Vivas E., Allende-Cid H., Salas R. A systematic review of statistical and machine learning methods for electrical power forecasting with reported mape score. *Entropy*. 2020;22(12):1412. <https://doi.org/10.3390/e22121412>.
20. Al-Dahidi S., Ayadi O., Alrbai M., Adeeb J. Ensemble approach of optimized artificial neural networks for solar photovoltaic power prediction. *IEEE Access*. 2019;7:81741-81758. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2923905>.

Список источников

1. Qazi A., Hussain F., Rahim N.A.B.D., Hardaker G., Alghazzawi D., Shaban K., et al. Towards sustainable energy: a systematic review of renewable energy sources, technologies, and public opinions // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 63837–63851. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906402>.
2. Hassan Q., Algburi S., Sameen A.Z., Salman H.M., Jaszczur M. A review of hybrid renewable energy systems: solar and wind-powered solutions: challenges, opportunities, and policy implications // Results in Engineering. 2023. Vol. 20. P. 101621. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621>.
3. Said D. Intelligent photovoltaic power forecasting methods for a sustainable electricity market of smart micro-grid // IEEE Communications Magazine. 2021. Vol. 59. Iss. 7. P. 122–128. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2001140>.
4. Li Qing, Zhang Xinyan, Ma Tianjiao, Jiao Chunlei, Wang Heng, Hu Wei. A multi-step ahead photovoltaic power prediction model based on similar day, enhanced colliding bodies optimization, variational mode decomposition, and deep extreme learning machine // Energy. 2021. Vol. 224. P. 120094. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120094>.
5. Wang Kejun, Qi Xiaoxia, Liu Hongda. A comparison of day-ahead photovoltaic power forecasting models based on deep learning neural network // Applied Energy. 2019. Vol. 251. P. 113315. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113315>.
6. Mayer M.J., Gróf G. Extensive comparison of physical models for photovoltaic power forecasting // Applied Energy. 2021. Vol. 283. P. 116239. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116239>.
7. De Giorgi M.G., Congedo P.M., Malvoni M. Photovoltaic power forecasting using statistical methods: impact of weather data // IET Science, Measurement & Technology. 2014. Vol. 8. P. 90–97. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2013.0135>.
8. Markovics D., Mayer M.J. Comparison of machine learning methods for photovoltaic power forecasting based on numerical weather prediction // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 161. P. 112364. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112364>.
9. Liu Ling, Liu Fang, Zheng Yuling. A novel ultra-short-term PV power forecasting method based on DBN-based Takagi-Sugeno fuzzy model // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 20. P. 6447. <https://doi.org/10.3390/en14206447>.
10. Tai Bin, Yu Lei, Huang Yangjue, Wang Jinfeng, Wang Yin, Zhu Yuanzhe, et al. Power prediction of photovoltaic power generation based on LSTM model with additive attention mechanism // 7th International Conference on Smart Grid and Smart Cities (Lanzhou, 22–24 September 2023). Lanzhou, 2023. P. 474–480. <https://doi.org/10.1109/ICGSC59580.2023.10319231>.
11. Wang X., Zhou X., Xing J., Yang J. A prediction method of PV output power based on the combination of improved grey back propagation neural network // Journal of Solar Energy. 2021. Vol. 7. P. 81–87. <https://doi.org/10.7667/PSPC151675>.
12. Liu Fang, Li Ranran, Li Yong, Yan Ruifeng, Saha Tapan. Takagi-Sugeno fuzzy model-based approach considering multiple weather factors for the photovoltaic power short-term forecasting // IET Renewable Power Generation. 2017. Vol. 11. P. 1281–1287. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.1036>.
13. Hossain M.S., Mahmood H. Short-term photovoltaic power forecasting using an LSTM neural network and synthetic weather forecast // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 172524–172533. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3024901>.
14. Dolara A., Grimaccia F., Leva S., Mussetta M., Ogliari E. Comparison of training approaches for photovoltaic forecasts by means of machine learning // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. Iss. 2. P. 228. <https://doi.org/10.3390/app8020228>.
15. Ozaki Yo., Yano M., Onishi M. Effective hyperparameter optimization using Nelder-Mead method in deep learning // IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications. 2017. Vol. 9. Iss. 20. P. 1–12. <https://doi.org/10.1186/s41074-017-0030-7>.
16. Sherstinsky A. Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network // Physica D: Nonlinear Phenomena. 2020. Vol. 404. P. 132306. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2019.132306>.
17. Muhuri P.S., Chatterjee P., Yuan Xiaohong, Roy K., Esterline A. Using a long short-term memory recurrent neural network (LSTM-RNN) to classify network attacks // Information. 2020. Vol. 11. Iss. 5. P. 243. <https://doi.org/10.3390/info11050243>.
18. Lee Donghun, Kim Kwanho. Recurrent neural network-based hourly prediction of photovoltaic power output using meteorological information // Energies. 2019. Vol. 12. Iss. 2. P. 215. <https://doi.org/10.3390/en12020215>.
19. Vivas E., Allende-Cid H., Salas R. A systematic review of statistical and machine learning methods for electrical power forecasting with reported mape score // Entropy. 2020. Vol. 22. Iss. 12. P. 1412. <https://doi.org/10.3390/e22121412>.
20. Al-Dahidi S., Ayadi O., Alrbai M., Adeeb J. Ensemble approach of optimized artificial neural networks for solar photovoltaic power prediction // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 81741–81758. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2923905>.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Song Liu,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
1972087620@qq.com

Karthik S. Parihar,
Postgraduate Student,
Indian Institute of Technology Roorkee,
Roorkee, Uttaranchal 247667, India
ks_parihar@ee.iitr.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лю Сун,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
1972087620@qq.com

Парихар Картик Сингх,
аспирант,
Индийский технологический институт Рурки,
247667, г. Рурки, штат Уттаранчал, Индия
ks_parihar@ee.iitr.ac.in

Mukesh K. Pathak,
Professor,
Head of the Department of Electrical Engineering,
Indian Institute of Technology Roorkee,
Roorkee, Uttaranchal 247667, India
mukesh.pathak@ee.iitr.ac.in

Denis N. Sidorov,
Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Professor of the Russian Academy of Sciences,
Chief Researcher,
Applied Mathematics Department,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
Professor of the Laboratory of Industrial Mathematics
of the Baikal School of BRICS,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ contact.dns@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3131-1325>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

Denis N. Sidorov has been a member of the editorial board of the iPolytech Journal since 2021, but she did not take part in making decision about publishing the article under consideration. The article was reviewed following the Journal's review procedure. The authors did not report any other conflicts of interest.

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

Information about the article

The article was submitted 09.01.2024 г.; approved after reviewing 27.01.2024 г.; accepted for publication 02.02.2024 г.

Патхак Микеш Кумар,
профессор,
заведующий кафедрой электротехники,
Индийский технологический институт Рурки,
247667, г. Рурки, штат Уттаранчал, Индия
mukesh.pathak@ee.iitr.ac.in

Сидоров Денис Николаевич,
д-р ф.-м. наук, профессор РАН,
главный научный сотрудник,
Отдел прикладной математики,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
профессор Лаборатории промышленной
математики БИ БРИКС,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ contact.dns@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3131-1325>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Сидоров Д.Н. является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2021 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 09.01.2024; одобрена после рецензирования 27.01.2024; принята к публикации 02.02.2024.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 51-7:519.688

EDN: QYXHRQ

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-124-138



Коррекция элементов мутантных векторов метода дифференциальной эволюции при решении задачи минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем

Д.В. Якубовский^{1✉}, Д.С. Крупенёв², Д.А. Бояркин³¹⁻³Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель – повышение эффективности численных методов оптимизации в рамках расчетов задач минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем, а именно метода дифференциальной эволюции и его вариаций – адаптивной aDE и самонастраивающейся jDE. Экспериментальные исследования и апробация предложенных корректировок проводились на электроэнергетических системах разной размерности со сложной структурой. Данные системы представляются и реализуются математическими моделями минимизации дефицита мощности с возможностью их анализа в рамках оценки балансовой надежности с помощью разработанного программного комплекса. В процессе проведенного анализа составляющих метода дифференциальной эволюции и существующих вариантов работы процесса мутации было обнаружено, что имеющиеся подходы данного процесса могут быть дополнительно изменены. Это впоследствии может повысить скорость решения задач. Показано, что основные изменения включают в себя дополнительную проверку соответствия мутантных векторов верхним и нижним ограничениям, а в случае их несоответствия рассматриваются три варианта коррекции. Существующие подходы предлагают формирование новых элементов вектора, выходящих за пределы ограничений, за счет применения случайных чисел в рамках ограничений. Авторами предлагается использовать «проекции» найденных элементов вектора, т.е. использование значений верхних или нижних ограничений при их нарушении для конкретного элемента в качестве значений мутантного вектора. Показано, что реализованный метод с использованием коррекции элементов мутантных векторов имеет преимущество в виде снижения времени решения задач на 47% в сравнении с существующими способами коррекции при сохранении той же точности. Показано, что наиболее эффективными вариациями для решения поставленных задач являются aDE и jDE. Полученные результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность и преимущества применения предложенного авторами способа корректировки в процессе мутации в виде «проекций», а также использования aDE и jDE вариаций метода дифференциальной эволюции для решения задач минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем.

Ключевые слова: минимизация дефицита мощности, дифференциальная эволюция, мутантный вектор, электроэнергетическая система

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2023-0003) программы фундаментальных исследований РФ на 2023–2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13. ЦКП.21.0038).

Для цитирования: Якубовский Д.В., Крупенёв Д.С., Бояркин Д.А. Коррекция элементов мутантных векторов метода дифференциальной эволюции при решении задачи минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 124–138. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-124-138>. EDN: QYXHRQ.

POWER ENGINEERING

Original article

Adjustment of mutant vector elements in the differential evolution method for solving the problem of power shortage minimization in electric power systems

Dmitrii V. Yakubovskii^{1✉}, Dmitry S. Krupenev², Denis A. Boyarkin³¹⁻³Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

© Якубовский Д.В., Крупенёв Д.С., Бояркин Д.А., 2024

Abstract. The article is aimed at increasing the effectiveness of numerical optimization methods in calculations of problems concerning power shortage minimization in electric power systems, specifically the differential evolution (DE) method and its variations—aDE and jDE. Experimental studies and testing of the proposed adjustments were carried out on complex electric power systems of different order. These systems are represented and realized by means of mathematical models of power shortage minimization with the possibility of their analysis using the developed software package as part of adequacy assessment. The performed analysis of the DE method elements and the existing variants of the mutation process revealed that the existing approaches can be further modified. This can subsequently increase the speed of problem-solving. It is shown that the main changes include an additional check that the mutant vectors meet the upper and lower bounds, and if they fail to do so, three adjustment options are considered. Existing approaches propose to generate new vector elements beyond the bounds by applying random numbers within the bounds. The present authors propose to use the “projections” of the found vector elements, i.e., to use the values of upper or lower bounds when they are exceeded for a particular element as mutant vector values. The implemented method involving the adjustment of mutant vector elements is shown to offer an advantage of a 47% reduction in problem-solving time over existing adjustment methods while maintaining the same accuracy. It is noted that aDE and jDE are the most effective variations for solving stated problems. The obtained results of experimental studies confirm the effectiveness and advantages of applying the proposed adjustment method in mutation process of in the form of “projections”, as well as using aDE and jDE variations of the DE method to solve the problems of power shortage minimization in electric power systems.

Keywords: power shortage minimization, differential evolution, mutation vector, electric power system

Acknowledgements: The research was carried out under the State Assignment Project (no. FWEU-2023-0003) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation for the period 2023-2030 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: Iakubovskii D.V., Krupenev D.S., Boyarkin D.A. Adjustment of mutant vector elements in the differential evolution method for solving the problem of power shortage minimization in electric power systems. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):124-138. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-124-138>. EDN: QYXHRQ.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из существенных задач в области энергетики является своевременная оценка и обеспечение требуемого уровня балансовой надежности. Данные задачи обязательно должны решаться в непрерывно и динамично развивающихся и усложняющихся электроэнергетических системах (ЭЭС). Одной из решаемых задач при обеспечении требуемого уровня балансовой надежности является обоснование уровня резервов различных видов в ЭЭС и определение необходимых поправок в планах по вводу новых и выводу устаревших или аварийных элементов ЭЭС. Вычислительно такие задачи по расчету обеспечения резервов мощности имеют большую размерность, поэтому модернизация математических методов оценки балансовой надежности необходима для обеспечения точности и скорости получаемых решений.

Основным используемым методом оценки балансовой надежности является метод статистических испытаний (Монте-Карло)^{4,5} [1–7]. Оценка балансовой надежности на его основе включает в себя следующие этапы: на первом осуществляется формирование случайных расчетных состояний ЭЭС для каждого часа периода оценки; на втором – формирование задачи на основе математической модели минимизации дефицита мощности (МДМ) и ее решение методами оптимизации для каждого сформированного состояния; на третьем – результаты второго этапа анализируются и проводится вычисление комплекса показателей балансовой надежности (ПБН).

На сегодняшний день в области оценки балансовой надежности одним из актуальных направлений исследований является улучшение соответствия математических моделей МДМ реальным условиям эксплуатации и применение более эффективных численных методов оптимизации. В рамках работы был проанализирован ряд различных программных комплексов для оценки балансовой надежности [8–10], таких как ANTARES^{6,7}. Оценка надежности передачи крупномасштабных систем TRELSS [11–13], Power Technologies International PSS[®] E OPF, TPLAN компании Siemens^{8–11}[14], CORAL¹² [8, 9]. Оценка рисков надежности и адек-

⁴Розанов М.Н. Надежность электроэнергетических систем: справочник. М.: Энергоатомиздат, 2000. Т. 2. 568 с.

⁵Антонов Г.Н., Зоркальцев В.И., Кривоуцкий Л.Д., Малащенко Ю.Е., Руденко Ю.Н. Надежность систем энергетики и их оборудования: справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики. М.: Энергоатомиздат, 1994. Т. 1. 480 с.

ватности сети GRARE¹³, PLEXOS¹⁴, Многозонное моделирование надежности MARS, MAPS [15–17], GridView¹⁴, NARP [8], MARELI; а также «ОРИОН-М», «ПОТОК-3», «ЯНТАРЬ» [18] и «Надежность». Большинство комплексов проводят расчеты, пользуясь потоковыми (GRARE, CORAL, «ПОТОК-3»), линейными или линеаризованными моделями. Некоторые комплексы работают с моделями минимизации затрат, что отличается от оригинальной задачи минимизации дефицита мощности и, в свою очередь, ставит под сомнение полученные решения в рамках оценки балансовой надежности. Также важным замечанием является то, что модели минимизации дефицита мощности ЭЭС с учетом линейных потерь при перетоках мощности (которые применяются в обозначенных комплексах) содержат допущения, связанные с учетом неполного объема потерь при передаче энергии. Ранее в [5] и [18] было показано, что модели с квадратичными потерями корректнее отражают работу реальных ЭЭС и близки к ним по физическому смыслу.

Учитывая специфику применяемых моделей и сформированных задач на их основе, в каждом анализируемом программном комплексе применяются соответствующие методы оптимизации. Например, метод Зауэра (Sauer) является поточным и решает задачи в комплексе GRARE, где используются линеаризованные модели. Аналогично метод Форда-Фалкерсона ранее использовался в программном комплексе «ПОТОК» для решения задач. Кроме того, в других программных комплексах для решения линейных задач применяются симплекс-методы, а также линейные решатели и системы моделирования, такие как GAMS и CPLEX. МДМ, в свою очередь, меняются, усложняются и линеаризуются. В некоторых программных комплексах для их решения используются различные реализации метода внутренних точек и нелинейные решатели из обозначенных систем моделирования высокого уровня.

Авторами были проведены исследования разработанных математических моделей МДМ и методов решения задач на их основе [19–22]. По результатам проведенных исследований выявлено, что существующие математические модели формируют многоэкстремальные задачи, в связи с чем было решено использовать метод дифференциальной эволюции. В ходе экспериментов метод дифференциальной эволюции показывал стабильные результаты работы, где все полученные решения для различных конфигураций ЭЭС были идентичны полученным решениям математического пакета GAMS, решателя CONOPT.

В работе представлено исследование применения модификаций по корректировке результатов блока мутации в различных версиях метода дифференциальной эволюции с учетом нескольких стратегий мутации.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В расчетах для МДМ используется имитационное моделирование ЭЭС и методы оптимизации для решения задач на их основе. Такой подход позволяет определить дефицит мощности для каждого из рассматриваемых состояний системы. Разработка моделей и применение различных методов оптимизации происходили в непрерывном процессе.

На текущий момент разработаны модели МДМ, которые различаются в учете особенностей функционирования ЭЭС. Это непосредственно влияет на адекватность определения уровня дефицита мощности и других показателей надежности, а также на сложность представления энергосистемы.

⁶Antares. Optimization problems formulation. 2017. P. 2/15–15/15. Режим доступа: <https://antares-simulator.org/media/files/page/UC4V8-170522-Antares-Optimization-Problems-Formulation.pdf> (дата обращения: 04.02.2023).

⁷RTE Antares, Modelling of flow-based domains in Antares for adequacy studies. 2017. P. 1/37–36/37. Режим доступа: <https://antares-simulator.org/media/files/page/ZHX0N-171024-Rte-Modelling-of-Flow-Based-Domains-in-Antares-for-Adequacy-Studies.pdf> (дата обращения: 04.02.2023).

⁸Model management module for PSS®E // Siemens Power Technologies International. 2020. Режим доступа: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:cff6e4a4-5776-4a0a-8c50-283c0aa6a761/pss-e-ModelManagementModule-datasheet-EN-v2-0_original.pdf (дата обращения: 07.02.2023).

⁹Optimal Power Flow PSS®E // Siemens Power Technologies International. 2014. Режим доступа: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:27e9879f51bca33eea4616f85925b1ae69286bf2/pti-ff-en-swpe-optpowflow-1412.pdf> (дата обращения: 07.02.2023).

Основная идея заключается в формировании задачи на основе модели МДМ, используя данные, полученные после создания конкретных случайных состояний системы, и далее происходит оптимизация этих состояний, где определяются минимумы дефицита мощности. В математических моделях должны быть определены параметры, такие как мощности генераторов и нагрузок для всех зон надежности, пропускные способности связей и коэффициенты потерь мощности при ее передаче. Общая задача состоит в поиске распределения мощности в системе при учете минимума дефицита мощности с возможностью обеспечения максимально возможного покрытия нагрузки с учетом баланса мощности в зонах надежности для каждого конкретного сформированного состояния. Важно также максимально соответствовать физическим процессам потокораспределения для получения объективной картины работы системы в конкретных режимах.

В итоге исследуются методы решения задачи МДМ в нелинейном виде, которая содержательно может быть сформулирована следующим образом [5]: «Необходимо получить оптимальное потокораспределение ЭЭС в рамках имеющихся известных параметров генерирующей мощности, уровней нагрузок потребителей, максимально допустимых перетоков и коэффициентов потерь мощности при ее передаче».

Формулировка проблемы, целевая функция:

$$\min_{y,x,z} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i); \quad (1)$$

нелинейные балансовые ограничения, с квадратичными потерями при перетоках мощности:

$$x_i - y_i + \sum_{j=1}^n (1 - a_{ji} z_{ji}) z_{ji} - \sum_{j=1}^n z_{ij} = 0, i = 1, \dots, n; \quad (2)$$

верхние и нижние ограничения на переменные:

$$0 \leq y_i \leq \bar{y}_i, i = 1, \dots, n; \quad (3)$$

$$0 \leq x_i \leq \bar{x}_i, i = 1, \dots, n; \quad (4)$$

$$0 \leq z_{ij} \leq \bar{z}_{ij}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, i \neq j, \quad (5)$$

где **оптимизируемые параметры**: x_i – используемая генерирующая мощность в зоне надежности i , МВт; y_i – обеспечиваемая нагрузка потребителей в зоне надежности i , МВт; z_{ij} и z_{ji} – рассчитанные перетоки мощности по линиям электропередачи (ЛЭП) из зоны надежности i в зону надежности j и из зоны надежности j в зону надежности i соответственно, МВт;

установленные границы: $\bar{x}_i$ – максимум генерирующей мощности в зоне надежности i , МВт; $\bar{y}_i$ – максимум нагрузки в зоне надежности i , МВт; z_{ij} и z_{ji} – максимально допустимые перетоки мощности между зонами надежности i и j , а также j и i соответственно, МВт; a_{ji} – коэффициенты удельных потерь мощности при ее передаче из зоны надежности j в зону надежности i , $j \neq i$, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n$.

¹⁰High-performance transmission planning and operations software for the power industry. PSS®E – Overview // Siemens. 2014. Режим доступа: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:480a532bff8def3f8531fff18f7ccf446001e685/siemenspti-software-psse-brochure-2017.pdf> (дата обращения: 25.06.2023).

¹¹PSR – Energy Consulting and Analytics. OPTGEN User Manual. Version 7.4. 2019. Режим доступа: <https://www.youtube.com/c/PSREnergyConsultingandAnalytics/videos> (дата обращения: 25.06.2023).

¹²Mid-term Adequacy Forecast 2018, Appendix 1: Methodology and Detailed Results // ENTSOE. 2018. 62 p. Режим доступа: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/sdc-documents/MAF/MAF_2018_Methodology_and_Detailed_Results.pdf (дата обращения: 25.06.2023).

¹³Market Simulation Software. PLEXOS. Режим доступа: <https://energyexemplar.com/solutions/plexos> (дата обращения: 04.02.2023).

¹⁴Simulate security-constrained unit commitment and economic dispatch in large-scale transmission networks // ABB GridView. 2016. Режим доступа: https://library.e.abb.com/public/f556c940eb03414da5ea0f3671baef8c/GridView-brochure_9AKK106930A8192-A4-web.pdf?x-sign=ltHqZpuwLYeuRiOJCvtm90+45NMqCbktprV4PnyeQaE8g5PUUnKDEw1htqg80uguC (дата обращения: 25.06.2023).

Коэффициенты удельных потерь мощности в ЛЭП при ее передаче были определены в соответствии с [8, 10] и рассчитываются следующим образом:

$$a_{ji} = \frac{r_{ji}}{U_{\text{ном}}^2 \cos^2 \varphi_{ji}}, j = 1, \dots, J, i = 1, \dots, I, i \neq j, \quad (6)$$

где: r_{ji} – активное сопротивление линии электропередачи между зонами надежности j и i , Ом_км; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение ЛЭП между зонами надежности j и i , кВ; $\cos^2 \varphi_{ji}$ – усредненный коэффициент мощности межзональных связей между зонами надежности j и i (обычно принимается равным 0,9).

$$z_{ji} \cdot z_{ij} = 0, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n. \quad (7)$$

Модель (1)–(7) (далее М) является моделью потокораспределения мощности электроэнергетических систем и применяется в области оценки балансовой надежности. Эта модель может рассматриваться с точки зрения решения транспортной задачи. В основе модели лежит целевая функция минимизации дефицита мощности при учете балансовых ограничений равенств, которые вносят основной вклад при моделировании распределения активной мощности по узлам (зонам надежности). Также для корректного моделирования встречных перетоков мощности используется дополнительное ограничение (7), это позволяет внести однозначность в направление перетока мощности в каждом режиме работы системы.

Метод дифференциальной эволюции (от англ. differential evolution DE) – это популярный метаэвристический метод оптимизации, используемый для многомерных функций с действительными значениями [23–29]. Данный метод использует совокупность индивидуальных решений и относится к классу стохастических алгоритмов оптимизации при использовании некоторых идей генетических алгоритмов, однако не требует работы с переменными в бинарном коде.

Рассматриваемый метод DE в своей основе использует вычисления значений целевой функции и новых векторов решений, без необходимости вычисления ее производных. Это позволяет значительно сократить время расчетов, не требуя времязатратной процедуры дифференцирования на каждом шаге итерационного процесса.

На рис. 1 приведен псевдокод работы алгоритма дифференциальной эволюции. Основная идея состоит в поиске решений среди сформированных отдельных векторов, которые обновляются на каждой итерации (в данном случае поколении). Новые векторы (потенциальные решения) создаются путем комбинирования (мутации) существующих векторов в соответствии с подходящей стратегией мутации, последующим скрещиванием и выбором

```

Инициализация:
N = размерность задачи; NP = N*10;
F = rand (0.1, 1.0);
CR = rand (0.0, 1.0);
P_max = 50000;
G = 1;
PG = инициализация популяции случайными числами;
while (критерий останова не удовлетворен или G≠P_max) do
  best = определить лучший вектор
  for  $i$  with each individual  $x_G^i$  in PG do
     $x_G^{mut}$  = Мутация (Стратегия мутации, F,  $x_G^i$ , best)
     $u_G^i$  = Скрещивание (CR,  $x_G^i$ ,  $x_G^{mut}$ )
     $x_{G+1}^i$  = Выбор ( $x_G^i$ ,  $u_G^i$ )
  end for
  G = G+1
end while

```

Рис. 1. Псевдокод алгоритма метода дифференциальной эволюции
Fig. 1. Pseudocode of the differential evolution method algorithm

(селекцией). Кандидаты с наилучшими значениями целевой функции сохраняются в следующем поколении (итерации), постепенно улучшая ценность индивидов и формируя более жизнеспособные и подходящие популяции. Процесс повторяется до момента срабатывания критерия останова.

Метод учитывает верхние и нижние границы при вычислении новых особей (векторов с решениями) в популяции. Это достигается путем последовательного применения процессов мутации, скрещивания и выбора для каждого вектора популяции. Такой подход облегчает работу с целевой функцией, поскольку не требует дополнительных штрафных ограничений, что особенно полезно при решении задач с верхними и нижними ограничениями на переменные. В качестве стратегии мутации может быть выбран один из проверенных вариантов [25]:

$$\text{DE_rand_1 (DR1)} \quad (8)$$

$$\text{DE_best_1 (DB1)} \quad x_G^{mut} = x_G^{best} + F(x_G^{r1} - x_G^{r2}); \quad (9)$$

$$\text{DE_current to rand_1 (DCR1)} \quad x_G^{mut} = x_G^i + F(x_G^{r1} - x_G^i) + F(x_G^{r2} - x_G^{r3}); \quad (10)$$

$$\text{DE_current to best_1 (DCB1)} \quad x_G^{mut} = x_G^i + F(x_G^{best} - x_G^i) + F(x_G^{r1} - x_G^{r2}); \quad (11)$$

$$\text{DE_rand_2 (DR2)} \quad x_G^{mut} = x_G^{r1} + F(x_G^{r2} - x_G^{r3}) + F(x_G^{r4} - x_G^{r5}); \quad (12)$$

$$\text{DE_best_2 (DB2)} \quad x_G^{mut} = x_G^{best} + F(x_G^{r1} - x_G^{r2}) + F(x_G^{r3} - x_G^{r4}). \quad (13)$$

Данный подход позволяет уделять большее внимание наиболее сильной особи (вектору) в популяции, что может привести к более быстрому достижению решения или к снижению разнообразия популяции и застреванию в локальных минимумах. Из-за этого важно исследовать применимость различных стратегий (8)–(13) к конкретной задаче, чтобы выбрать наиболее эффективную.

Метод дифференциальной эволюции имеет множество различных вариантов его реализации, некоторые из них являются самонастраивающимися, что придает методу универсальность и позволяет классифицировать как группу методов, обладающих различными возможностями и характеристиками. Одним из исследуемых методов является jDE [27], особенностью которого является возможность самостоятельно определять векторы F_G и CR_G для каждого вектора в популяции; данные векторы в свою очередь распределяются по группам $F_{pool\ G}$ и $CR_{pool\ G}$, соответственно, а начальные настроечные параметры определяются как $F_l = 0,1$; $F_u = 0,9$; $\tau_{1m} = 0,1$; $\tau_{2m} = 0,1$. Указанный метод позволяет решать задачи быстрее, чем это делает стандартный метод дифференциальной эволюции, в тоже время тонкая или грубая настройка не обязательны, т.к. параметры рассчитываются в процессе решения самой задачи. Подбор параметров F и CR осуществляется в каждом новом поколении в соответствии со следующими условиями:

$$F_{pool\ G+1}^i = \begin{cases} F_l + \text{случ. знач. } (0,0,1,0)_1 \cdot F_u, & \text{если случ. знач. } (0,0,1,0)_2 < \tau_1, \\ F, & \text{в других случаях} \end{cases}$$

$$CR_{pool\ G+1}^i = \begin{cases} \text{случ. знач. } (0,0,1,0)_3, & \text{если случ. знач. } (0,0,1,0)_4 < \tau_2, \\ CR, & \text{в других случаях} \end{cases}$$

Еще одним вариантом реализации DE является метод aDE. Алгоритм, описанный в [28], имеет схожую логику вычислительного процесса с ранее описанным алгоритмом. Значения изначальных параметров устанавливаются в рамках такой же схемы, как и в jDE. Тем не менее существенные отличия претерпевают алгоритмы формирования новых параметров F и CR . Регулировка способа задания F и CR происходит с помощью значения среднего арифметического от значений целевых функций во всей популяции f_{avg} , таким образом подбор параметров F и CR происходит следующим образом:

$$F_{pool\ G+1}^i = \begin{cases} \text{if } f(x_G^i) < f_{avg}, \text{ then } F_{G+1}^i, \\ \text{else } rand(0.1, 1.0) \end{cases}$$

$$CR_{pool\ G+1}^i = \begin{cases} \text{if } f(x_G^i) < f_{avg}, \text{ then } CR_{G+1}^i \\ \text{else } rand(0.0, 1.0) \end{cases}$$

МОДИФИКАЦИЯ КОРРЕКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ МУТАНТНЫХ ВЕКТОРОВ

Обычно варианты алгоритмов и методов дифференциальной эволюции непосредственно используют известные этапы мутации, скрещивания и (селекции) выбора, которые применяются к каждому вектору в популяции, а поколения из векторов циклически сменяются новыми. Однако при реализации этих методов не многие отклоняются от существующих описаний, что иногда приводит к узким местам и негативно сказывается на эффективности метода. Одним из таких узких мест можно считать блок мутации (рис. 2).

```

i – индекс целевого вектора в популяции;
while (r1 == i) do r1 = случ.число(NP – 1);
while (r2 == i или r2 == r1) do r2 = случ.число(NP – 1);
while (r3 == i или r3 == r2 или r3 == r1) do r3 = случ.число(NP – 1);
for j от 0 до N
     $x_{G,j}^{mut} = x_G^{r1} + F(x_G^{r2} - x_G^{r3});$ 
end for

```

Рис. 2. Псевдокод процесса мутации в алгоритме DE

Fig. 2. Mutation pseudocode in the differential evolution algorithm

Основой процедуры мутации является создание нового вектора мутанта путем случайного выбора векторов и следования стратегии мутации. Однако в специализированной литературе практически отсутствует анализ ситуации, когда элементы полученного вектора с мутациями выходят за определенные нижние и/или верхние границы.

В случае, когда решается задача минимизации дефицита мощности, в совокупности с методом DE применяется техника (метод перехода от условной задачи к безусловной) штрафных функций для работы с ограничениями. Этот метод многократно увеличивает значение целевой функции, если параметры выходят за пределы ограничений. В результате таких мутаций значительно возрастает число векторов в популяции, нарушающих ограничения, что существенно влияет на работу метода DE. В итоге полноценное решение задачи МДМ не достигается. Однако в случае решения безусловных задач, таких как определение минимума функции Розенброка, метод находит решение успешно.

Для обеспечения полноценной работы метода с задачами, основанными на модели *M*, и чтобы избежать решений, которые не соответствуют нижним $x_{G,j}^L$ и верхним $x_{G,j}^U$ ограничениям переменных, необходимо дополнить блок мутации. В данном случае вводится специальный этап, на котором происходит проверка соответствия сформированного элемента вектора мутанта заданным границам. В данной работе рассматривается всего три варианта формирования новых элементов, в том случае, если условие по границам во время проверки не выполняется.

В случае, показанном на рис. 3, далее – первый случай, значение вышедшего за границы элемента вычисляется с помощью генерации случайного числа в рамках верхней и нижней установленной границы. Это ограничение было предложено в алгоритме исследовательской работы в [28].

Путем сравнения времени работы данного способа контроля результата мутации и исходного варианта мутации были получены значения, которые показали, что дополнение контроля мутации ускорило поиск решения на 10–15%. Однако в другом источнике [29], а также в исходных кодах реализованного метода был обнаружен вариант с другим способом определения новых значений элементов вектора, тоже основанных на случайных числах (рис. 4). Новый элемент определяется следующим образом: вычисляется размер области возможных значений между верхними и нижними ограничениями, затем определяется случайное число от 0 до 1, которое

```

i – индекс целевого вектора в популяции;
while (r1 == i) do r1 = случ.число(NP – 1);
while (r2 == i или r2 == r1) do r2 = случ.число(NP – 1);
while (r3 == i или r3 == r2 или r3 == r1) do r3 = случ.число(NP – 1);

for j от 0 до N
     $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^{r1} + F(x_{G,j}^{r2} - x_{G,j}^{r3});$ 
    if  $x_{G,j}^{mut} < x_{G,j}^L$  или  $x_{G,j}^U < x_{G,j}^{mut}$ 
         $x_{G,j}^{mut} = \text{случ.число}(x_{G,j}^L, x_{G,j}^U);$ 
    end if
end for
    
```

Рис. 3. Псевдокод варианта контроля результата мутации 1
 Fig. 3. Pseudocode of the control option for the mutation 1 result

умножается на полученное значение размера области и прибавляется к нижнему значению. Подобный подход является усложненной версией, обозначенной в алгоритме контроля результата мутации 1, и в алгоритмическом виде может быть представлен следующим образом (рис. 4).

```

i – индекс целевого вектора в популяции;
while (r1 == i) do r1 = случ.число(NP – 1);
while (r2 == i или r2 == r1) do r2 = случ.число(NP – 1);
while (r3 == i или r3 == r2 или r3 == r1) do r3 = случ.число(NP – 1);

for j от 0 до N
     $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^{r1} + F(x_{G,j}^{r2} - x_{G,j}^{r3});$ 
    if  $x_{G,j}^{mut} < x_{G,j}^L$  или  $x_{G,j}^U < x_{G,j}^{mut}$ 
         $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^L + (x_{G,j}^U - x_{G,j}^L) \text{случ.число}(0,1);$ 
    end if
end for
    
```

Рис. 4. Псевдокод варианта контроля результата мутации 2
 Fig. 4. Pseudocode of the control option for the mutation 2 result

```

i – индекс целевого вектора в популяции;
while (r1 == i) do r1 = случ.число(NP – 1);
while (r2 == i или r2 == r1) do r2 = случ.число(NP – 1);
while (r3 == i или r3 == r2 или r3 == r1) do r3 = случ.число(NP – 1);
for j от 0 до N
     $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^{r1} + F(x_{G,j}^{r2} - x_{G,j}^{r3});$ 
    if  $x_{G,j}^{mut} < x_{G,j}^L$ 
         $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^L;$ 
    else if  $x_{G,j}^U < x_{G,j}^{mut}$ 
         $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^U;$ 
    end if
end for
    
```

Рис. 5. Псевдокод варианта контроля результата мутации 3
 Fig. 5. Pseudocode of the control option for the mutation 3 result

В качестве еще одного варианта коррекции контроля результата мутации (рис. 5) авторами предлагается следующий подход. В случае выхода значений полученных элементов вектора мутанта за пределы установленных верхних и нижних ограничений необходимо определить, какое из ограничений пересечено и установить на место элемента значение пересеченной границы. В данном случае используется практически оригинальный вектор, что должно повысить скорость работы метода в целом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные вычисления проводились для тестовых схем с тремя и семью зонами надежности (узлами), в качестве модели использовалась модель минимизации дефицита мощности с квадратичными потерями. На рис. 6 а обозначены параметры пропускных способностей линий для схемы с тремя узлами, где $C1 = 50$ МВт, $C2 = 5$ МВт, $C3 = 80$ МВт, а коэффициенты потерь $C1 = 0,000603255$, $C2 = 1,13037E-05$, $C3 = 0,000172891$.

На рис. 6 б обозначены линии для схемы с семью узлами, где пропускные способности $C12 = 360$ МВт, $C23 = 150$ МВт, $C24 = 200$ МВт, $C25 = 800$ МВт, $C45 = 1200$ МВт, $C56 = 300$ МВт, $C57 = 150$ МВт коэффициенты потерь $C12 = 0,000403555$, $C23 = 2,16047E-05$, $C24 = 0,00018299$, $C25 = 0,000225555$, $C45 = 1,14045E-05$, $C56 = 0,000522111$, $C57 = 0,000311655$.

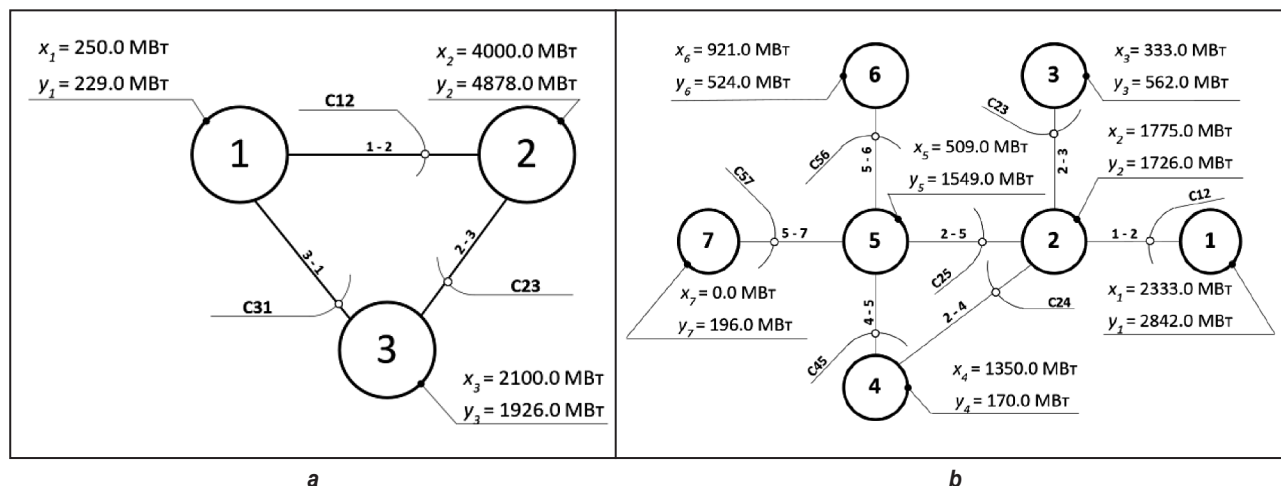


Рис. 6. Тестовые схемы экспериментальных систем: 3 узла (а), 7 узлов (б)
Fig. 6. Pilot circuits of experimental systems: 3 nodes (a), 7 nodes (b)

Анализ проводился на основании полученных расчетов, где каждый рассчитанный блок содержит в себе информацию о типе корректировки, стратегии мутации и модификации метода, где основная информация представлена временем расчетов (минимальное, максимальное и среднее значение для 25 расчетов). Итоговые результаты ранжировались по возрастанию для среднего значения времени расчета.

Цветовая схема определяет стабильность получаемых результатов, где темно-серым обозначены некорректные результаты с частыми попаданиями в локальные минимумы или отсутствием сходимости; светло-серым обозначены близкие к показателю минимума результаты, однако в которых также присутствуют близлежащие локальные минимумы; белым обозначены полностью стабильные, корректные, идентичные результаты. Наиболее показательными являются результаты работы метода для семиузловой системы, т.к. очень наглядно показывают разницу во времени выполнения оптимизации. В табл. 1 дополнительно выделены наилучшие связки видов контроля мутаций и стратегий мутаций, которые обозначены рамками и полужирным курсивным шрифтом.

Из результатов, представленных в табл. 1, можно сделать вывод, что для метода DE наиболее эффективными являются связки контроля мутации 3 и стратегии мутации DE_current to best_1 для трехузловых систем, которые показывают наименьшее время решения задачи с учетом получения корректных и стабильных дефицитов мощности для трехузловых систем. При решении задачи для семиузловых систем наилучшим образом себя проявили связки контроля мутации 3 и стратегии мутации DE_current to best_1.

По результатам расчетов модифицированным самонастраивающимся методом aDE, представленных в табл. 2, полученные значения показывают наибольшее преимущество в рамках использования 3-го типа корректировки мутации и стратегий мутации DE_rand_1 и DE_current to rand_1. Существенное снижение доходит до двух раз к ближайшему стабильному конкуренту корректировки мутации 2-го типа.

Таблица 1. Результаты расчетов для трех- и семиузловых систем методом DE

Table 1. Calculation results for three- and seven-node systems using the differential evolution (DE) method

3 узла				7 узлов			
Стратегия мутации / время работы (мс)	DE			Стратегия мутации / время работы (мс)	DE		
	min	max	avg		min	max	avg
B3_DB1	0	42	5	B3_DB1	0	695	215
B2_DB1	30	142	76	B3_DCB1	575	5317	2026
B1_DCB1	37	173	83	B2_DCB1	1254	6007	2612
B3_DCB1	20	415	109	B1_DCB1	1745	6534	3356
B1_DB1	63	275	128	B2_DCR1	1618	6451	3894
B2_DCB1	44	479	132	B1_DB1	1717	6337	4762
B3_DR1	175	285	224	B3_DR1	5317	6691	5382
B3_DB2	216	387	238	B3_DCR1	5423	5464	5435
B1_DCR1	172	490	252	B3_DR2	5510	5577	5533
B3_DCR1	122	447	299	B1_DR1	6217	6265	6240
B2_DR1	309	424	372	B2_DB1	6259	6972	6484
B2_DCR1	220	498	423	B1_DCR1	6492	6795	6562
B1_DR1	361	617	426	B2_DR1	6503	7640	6647
B3_DR2	416	469	432	B3_DB2	6874	7016	6917
B2_DB2	427	562	503	B1_DB2	7342	7809	7476
B1_DB2	539	569	549	B1_DR2	7609	7792	7658
B1_DR2	557	644	573	B2_DB2	7916	8173	8024
B2_DR2	559	632	585	B2_DR2	8494	8721	8539

Таблица 2. Результаты расчетов для трех- и семиузловых систем методом aDE

Table 2. Calculation results for three- and seven-node systems using a modified self-tuning aDE method

3 узла				7 узлов			
Стратегия мутации / время работы (мс)	aDE			Стратегия мутации / время работы (мс)	aDE		
	min	max	avg		min	max	avg
B3_DB1	0	24	7	B3_DB1	6	145	52
B1_DB1	11	32	18	B2_DB1	91	195	129
B2_DB1	10	50	23	B1_DB1	105	224	153
B3_DB2	40	83	40	B3_DB2	125	607	287
B1_DB2	28	106	59	B1_DB2	232	728	384
B2_DB2	30	142	70	B2_DB2	287	943	565
B3_DCB1	43	140	87	B3_DCB1	31	4571	2638
B3_DR1	40	183	106	B3_DR1	1565	5533	3077
B3_DR2	71	200	117	B3_DR2	1787	5742	3546
B2_DCB1	83	252	161	B3_DCR1	2086	5783	4773
B2_DR1	101	287	194	B2_DCB1	1956	6157	5180
B1_DR2	152	323	217	B1_DCB1	2570	6638	5548
B2_DR2	132	347	219	B2_DCR1	3889	6421	5571
B1_DCB1	111	487	257	B1_DR1	1356	6400	5574
B1_DCR1	162	403	276	B2_DR1	4984	6511	6280
B1_DR1	119	484	287	B1_DCR1	6159	6688	6614
B3_DCR1	159	473	329	B1_DR2	5752	7096	6790
B2_DCR1	166	522	369	B2_DR2	4857	7336	6832

Таблица 3. Результаты расчетов для трех- и семиузловых систем методом jDE
Table 3. Calculation results for three- and seven-node systems using a jDE method

3 узла	jDE			7 узлов	jDE		
Стратегия мутации \ время работы (мс)	min	max	avg	Стратегия мутации / время работы (мс)	min	max	avg
B3_DB1	0	238	25	B1_DB1	584	1708	850
B1_DB1	86	551	213	B3_DB1	11	2453	861
B2_DB1	111	538	250	B2_DB1	904	3109	1666
B3_DCB1	170	466	304	B3_DCB1	6082	6125	6096
B3_DB2	260	501	332	B3_DR1	6137	6195	6154
B2_DCB1	224	586	429	B3_DCR1	6231	6277	6248
B3_DR1	385	532	460	B3_DR2	6320	6374	6341
B1_DCB1	281	564	484	B2_DCR1	6618	6804	6719
B3_DCR1	495	536	510	B2_DCB1	6684	7044	6883
B3_DR2	497	547	520	B3_DB2	3926	7500	6889
B1_DR1	537	580	558	B2_DR1	6873	7228	7005
B1_DCR1	558	590	570	B1_DB2	3752	7954	7018
B2_DB2	274	637	572	B1_DCB1	7013	7309	7092
B2_DR1	559	590	575	B1_DCR1	7083	7489	7272
B2_DCR1	566	599	579	B1_DR1	7338	7531	7385
B1_DB2	494	622	592	B2_DB2	6368	7782	7617
B1_DR2	617	346	628	B1_DR2	7953	8102	8026
B2_DR2	622	697	651	B2_DR2	8412	9483	8620

Таблица 4. Итоговые результаты сравнения лучших результатов для каждого метода и вида контроля результата мутации

Table 4. Final comparison report of the best results for each method and type of mutation result control

Метод	Схема	Контроль результата мутации	Стратегия мутации	Лучший результат (мс)	Улучшение
Результаты расчетов для трехузловой системы					
DE	TC ₁	1	DE_current to rand_1	252	0%
DE	TC ₁	2	DE_rand_1	372	-47%
DE	TC ₁	3	DE_current to best_1	109	56%
aDE	TC ₁	1	DE_rand_2	217	0%
aDE	TC ₁	2	DE_current to best_1	161	26%
aDE	TC ₁	3	DE_current to best_1	87	60%
jDE	TC ₁	1	DE_current to best_1	484	0%
jDE	TC ₁	2	DE_current to best_1	429	12%
jDE	TC ₁	3	DE_current to best_1	304	38%
Результаты расчетов для семиузловой системы					
DE	TC ₂	1	DE_current to best_1	3356	0%
DE	TC ₂	2	DE_current to best_1	2612	23%
DE	TC ₂	3	DE_current to best_1	2026	40%
aDE	TC ₂	1	DE_rand_1	5574	0%
aDE	TC ₂	2	DE_current to best_1	5180	8%
aDE	TC ₂	3	DE_rand_1	3077	45%

Метод jDE показал худшие результаты по скорости работы как для трехузловых, так и для семиузловых систем, а стабильность его решений для семиузловых систем полностью отсутствовала. Тем не менее наилучшие преобладающие результаты (табл. 3) также показала связка контроля мутации 3-го типа и стратегии мутации DE_current to best_1. Ввиду отсутствия стабильных решений для семиузловых систем данный метод не был полноценно учтен в сравнении результатов работы с остальными связками и методами.

Итоговые результаты работы разных методов представлены в табл. 4. В ней показано наглядное сравнение всех методов и связок методов, исследованных в работе. Из табл. 4 видно, что наиболее эффективной можно считать связку контроля мутации 3 типа и стратегии мутации DE_current to best_1. В среднем ускорение получения решений данной связкой находится в пределах 47,8% по отношению к типу корректировки контроля мутации 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривалось применение методов дифференциальной эволюции, а именно – ее стандартный вариант, а также две самонастраивающиеся модифицированные версии aDE и jDE, с разными вариантами контроля корректировки и стратегиями мутации к решению задачи минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем. Представленная задача является нелинейной (квадратичной) многоэкстремальной. Для эффективной работы методов дифференциальной эволюции при решении задач минимизации дефицита мощности и для исключения возникновения решений, которые не соответствуют нижним и верхним ограничениям по переменным, в блок мутации был добавлен дополнительный этап проверки соответствия полученного элемента вектора заданным ограничениям. Всего было рассмотрено три варианта модификации этого подхода. Для проведения эксперимента были использованы схемы трех- и семиузловых схем электроэнергетических систем, где для каждой системы проводилось несколько испытаний – с каждым методом дифференциальной эволюции, с несколькими вариантами стратегии мутации, а также каждым вариантом корректировки контроля мутации. По результатам проведенных экспериментов наиболее эффективными связками для всех вариантов методов оказался третий предлагаемый тип корректировки контроля мутации, который позволил сократить время расчетов в среднем почти на 48% по сравнению с первым, ранее известным видом корректировки контроля мутации. Таким образом, намеченная цель работы была достигнута, а именно повысилась эффективность численных методов оптимизации для вариантов метода дифференциальной эволюции – адаптивного (aDE), самонастраивающегося (jDE) и стандартного (DE) в рамках решения задач минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем. В дальнейших исследованиях планируется более подробное изучение специфики строящихся задач, основанных на имеющихся моделях с целью упрощения и снижения количества переменных для имеющихся вариантов методов дифференциальной эволюции.

Список источников

1. Billinton R., Allan R. Reliability evaluation of power systems. London: Plenum Press, 1996. 509 p.
2. Обоскалов В.П. Надежность обеспечения баланса мощности электроэнергетических систем. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. 210 с.
3. Ковалев Г.Ф., Лебедева Л.М. Модель оценки надежности электроэнергетических систем при долгосрочном планировании их работы // Электричество. 2000. № 11. С. 17–24.
4. Фокин Ю.А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения. М.: Энергоатомиздат, 1985. 210 с.
5. Ковалев Г.Ф., Лебедева Л.М. Надежность систем электроэнергетики: монография / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2015. 224 с.
6. Ковалев Г.Ф., Лебедева Л.М. Комплекс моделей оптимизации режимов расчетных состояний при оценке надежности электроэнергетических систем. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2000. 74 с.
7. Зоркальцев В.И., Пержабинский С.М. Модель оценки дефицита мощности электроэнергетической системы // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика. 2010. Т. 3. Вып. 3 80–92. EDN: NDFVDJ.
8. Pourbeik P. Review of the current status of tools and techniques for risk-based and probabilistic planning in power systems. 2010. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/272482844_Review_of_the_Current_Status_of_Tools_and_Techniques_for_Risk-Based_and_Probabilistic_Planning_in_Power_Systems (дата обращения: 23.06.2023).

9. Carramolino F.B.R., Careri F., Kavvadias K., Gonzalez I.H., Zucker A., Peteves E. Systematic mapping of power system models // Expert survey, EUR 28875 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. 86 p. <https://doi.org/10.2760/422399>.
10. Antonopoulos G., Chondrogiannis S., Kanellopoulos K., Papaioannou I., Spisto A., Efthimiadis T., Fulli G. Assessment of underlying capacity mechanism studies for Greece // Expert survey, EUR 28611 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. 94 p. <https://doi.org/10.2760/51331>.
11. Gaikwad A., Agarwal S., Carden K., Wintermantel N., Meliopoulos S., Kumbale M. A study on probabilistic risk assessment for transmission and other resource planning. 2015. P. 1-1-D-139. Режим доступа: <https://pubs.naruc.org/pub.cfm?id=536DCE1C-2354-D714-5175-E568355752DD> (дата обращения: 23.06.2023).
12. Agudelo L.U. A novel method for the approximation of risk of blackout in operational conditions // Laboratoire Image, Signaux et Systèmes Intelligents. 2016. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/318119199_A_novel_method_for_the_Approximation_of_risk_of_Blackout_in_operational_conditions (дата обращения: 23.06.2023).
13. Papic M. Survey of tools for risk assessment of cascading outages // Panel Session on Cascading Failures (Detroit, July 24–28, 2011). Detroit: IEEE GM, 2011. 28 p.
14. Hong Ying-Yi, Lee Lun-Hui. Reliability assessment of generation and transmission systems using fault-tree analysis // Energy Conversion and Management. 2009. Vol. 50. Iss. 11. P. 2810–2817. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.06.026>.
15. Chu K. MARS Multi-Area Reliability Simulation, EOP – On Demand Feature. General Electric Company, 2014.
16. Jirutitijaroen P., Singh C. Reliability and cost tradeoff in multi-area power system generation expansion using dynamic programming and global decomposition // IEEE Transactions on power systems. 2006. Vol. 21. Iss. 3. P. 1432–1441. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.879248>.
17. McCalley J. Module PE.PAS.U21.5 Multiarea reliability analysis // Electrical & Computer Engineering. Iowa State University. 81 p.
18. Kovalev G.F., Lebedeva L.M. Reliability of power systems. Cham: Springer, 2019. 237 p.
19. Якубовский Д.В. Анализ моделей минимизации дефицита мощности при оценке балансовой надежности электроэнергетических систем // Системные исследования в энергетике: труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2018. Вып. 48. 131 с.
20. Iakubovskiy D.V., Krupenev D.S., Boyarkin D.A. An analysis of shortage minimization models to assess power system adequacy // Energy Systems Research. 2018. Vol. 1. No. 3. P. 25–32. <https://doi.org/10.25729/esr.2018.03.0003>.
21. Якубовский Д.В., Крупенёв Д.С., Бояркин Д.А. Модель минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем с учётом ограничений по контролируемым сечениям // Системы анализа и обработки данных. 2023. № 2. С. 95–120. <https://doi.org/10.17212/2782-2001-2023-2-95-120>. EDN: EPTTBK.
22. Якубовский Д.В., Крупенёв Д.С., Бояркин Д.А. Применение двухэтапной оптимизации в модели потокораспределения при оценке балансовой надёжности ЭЭС // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1. С. 85–95. <https://doi.org/10.25729/2413-0133-2019-1-07>. EDN: WSCRWE.
23. Storn R. Differential evolution research – trends and open questions // Advances in Differential Evolution. Studies in Computational Intelligence / eds. U.K. Chakraborty. Berlin: Springer, 2008. Vol. 143. P. 1–31. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68830-3_1.
24. Opara K., Arabas J. Comparison of mutation strategies in differential evolution – a probabilistic perspective // Swarm and Evolutionary Computation. 2018. Vol. 39. P. 53–69. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2017.12.007>.
25. Abbas Q., Ahmad Ja., Jabeen H. The analysis, identification and measures to remove inconsistencies from differential evolution mutation variants // Biological Sciences and Biotechnology. 2023. Vol. 49. Iss. 3. P. 52–68. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2017.43S.052>.
26. Georgioudakis M., Plevris V. A comparative study of differential evolution variants in constrained structural optimization // Frontiers in Built Environment. 2020. Vol. 6. <https://doi.org/10.3389/fbuilt.2020.00102>.
27. Noman N., Bollegala D., Iba H. An adaptive differential evolution algorithm // IEEE Congress of Evolutionary Computation (New Orleans, 5–8 June 2011). New Orleans: IEEE; 2011. P. 2229–2236. <https://doi.org/10.1109/CEC.2011.5949891>.
28. Пантелеев А.В., Дмитраков И.Ф. Применение метода дифференциальной эволюции для оптимизации параметров аэрокосмических систем // Электронный журнал «Труды МАИ». 2010. № 37. Режим доступа: <https://trudymai.ru/upload/iblock/f49/primeneniye-metoda-differentsialnoy-evolyutsii-dlya-optimizatsii-parametrov-aerokosmicheskikh-sistem.pdf> (дата обращения: 23.06.2023).
29. Feoktistov V. Differential evolution // Search of solutions. Berlin/Heidelberg: Springer, 2006. Vol. 5. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-36896-2>.

References

1. Billinton R., Allan R. Reliability evaluation of power systems. London: Plenum Press; 1996, 509 p.
2. Oboskalov V.P. *Reliable provision of electric power system energy balance*. Yekaterinburg: Yekaterinburg Ural State Technical University; 2002, 210 p. (In Russ.).
3. Kovalev G.F., Lebedeva L.M. Model to estimate reliability of electric power systems under long-term planning of their operation. *Elektrichestvo*. 2000;11:17-24. (In Russ.).
4. Fokin Yu.A. *Probabilistic-statistical methods in power supply system calculations*. Moscow: Energoatomizdat; 1985, 210 p. (In Russ.).
5. Kovalev G.F., Lebedeva L.M. *Reliability of electric power systems*. Novosibirsk: Nauka; 2015, 224 p. (In Russ.).

6. Kovalev G.F., Lebedeva L.M. A set of models to optimize design state modes when assessing electric power system reliability. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute SB RAS; 2000, 74 p. (In Russ.).
7. Zorkaltsev V.I., Perzhabinsky S.M. The model of power shortage evaluation of electrical power system. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State University. Series Mathematics*. 2010;3(3):80-92. (In Russ.). EDN: NDFVDJ.
8. Pourbeik P. Review of the current status of tools and techniques for risk-based and probabilistic planning in power systems. 2010. Available from: https://www.researchgate.net/publication/272482844_Review_of_the_Current_Status_of_Tools_and_Techniques_for_Risk-Based_and_Probabilistic_Planning_in_Power_Systems [Accessed 23th June 2023].
9. Carramolino F.B.R., Careri F., Kavvadias K., Gonzalez I.H., Zucker A., Peteves E. Systematic mapping of power system models. In: *Expert survey, EUR 28875 EN*. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2017, 86 p. <https://doi.org/10.2760/422399>.
10. Antonopoulos G., Chondrogiannis S., Kanellopoulos K., Papaioannou I., Spisto A., Efthimiadis T., Fulli G. Assessment of underlying capacity mechanism studies for Greece. In: *Expert survey, EUR 28611 EN*. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2017, 94 p. <https://doi.org/10.2760/51331>.
11. Gaikwad A., Agarwal S., Carden K., Wintermantel N., Melliopoulos S., Kumbale M. A study on probabilistic risk assessment for transmission and other resource planning. 2015. P. 1-1–D-139. Available from: <https://pubs.naruc.org/pub.cfm?id=536DCE1C-2354-D714-5175-E568355752DD> [Accessed 23th June 2023].
12. Agudelo L.U. A novel method for the approximation of risk of blackout in operational conditions // *Laboratoire Image, Signaux et Systèmes Intelligents*. 2016. Available from: https://www.researchgate.net/publication/318119199_A_novel_method_for_the_Approximation_of_risk_of_Blackout_in_operational_conditions [Accessed 23th June 2023].
13. Papic M. Survey of tools for risk assessment of cascading outages. In: *Panel Session on Cascading Failures*. 24–28 July 2011, Detroit. Detroit: IEEE GM; 2011, 28 p.
14. Hong Ying-Yi, Lee Lun-Hui. Reliability assessment of generation and transmission systems using fault-tree analysis. *Energy Conversion and Management*. 2009;50(11):2810-2817. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.06.026>.
15. Chu K. *MARS multi-area reliability simulation, EOP – on demand feature*. General Electric Company; 2014.
16. Jirutitijaroen P., Singh C. Reliability and cost tradeoff in multi-area power system generation expansion using dynamic programming and global decomposition. *IEEE Transactions on power systems*. 2006;21(3):1432-1441. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.879248>.
17. McCalley J. Module PE.PAS.U21.5 Multiarea reliability analysis. *Electrical & Computer Engineering*. Iowa State University. 81 p.
18. Kovalev G.F., Lebedeva L.M. *Reliability of power systems*. Cham: Springer; 2019, 237 p.
19. Iakubovskii D.V. Analysis of power shortage minimization models under electric power system balance reliability assessment. In: *Sistemnye issledovaniya v energetike: trudy molodykh uchenykh ISEM SO RAN = System research in energy: works of young scientists of MESI SB RAS*. Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute SB RAS; 2018, Iss. 48, 131 p. (In Russ.).
20. Iakubovskii D.V., Krupenev D.S., Boyarkin D.A. An analysis of shortage minimization models to assess power system adequacy. *Energy Systems Research*. 2018;1(3):25-32. <https://doi.org/10.25729/esr.2018.03.0003>.
21. Iakubovskii D.V., Krupenev D.S., Boyarkin D.A. A minimization model of the power shortage of electric power systems with regard to restrictions on controlled sections. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*. 2023;2:95-120. (In Russ.). <https://doi.org/10.17212/2782-2001-2023-2-95-120>. EDN: EPTTBK.
22. Iakubovskii D.V., Krupenev D.S., Boyarkin D.A. Application of two-stage optimization in the power flow distributing model while assessing the adequacy of electric power systems. *Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management*. 2019;1:85-95. (In Russ.). <https://doi.org/10.25729/2413-0133-2019-1-07>. EDN: WSCRWE.
23. Storn R. Differential evolution research – trends and open questions. In: Chakraborty U.K. (eds.). *Advances in Differential Evolution. Studies in Computational Intelligence*. Berlin: Springer; 2008, vol. 143, p. 1-31. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68830-3_1.
24. Opar K., Arabas J. Comparison of mutation strategies in differential evolution – a probabilistic perspective. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2018;39:53-69. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2017.12.007>.
25. Abbas Q., Ahmad Ja., Jabeen H. The analysis, identification and measures to remove inconsistencies from differential evolution mutation variants. *Biological Sciences and Biotechnology*. 2023;49(3):52-68. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2017.43S.052>.
26. Georgioudakis M., Plevris V. A comparative study of differential evolution variants in constrained structural optimization. *Frontiers in Built Environment*. 2020;6. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00102>.
27. Noman N., Bollegala D., Iba H. An adaptive differential evolution algorithm. In: *IEEE Congress of Evolutionary Computation*. 5–8 June 2011, New Orleans. New Orleans: IEEE; 2011, p. 2229-2236. <https://doi.org/10.1109/CEC.2011.5949891>.
28. Panteleev A.V., Dmitrakov I.F. Primenenie metoda differentsial'noj evolyucii dlya optimizatsii parametrov aerokosmicheskikh sistem. Application of the differential evolution method to optimize aerospace system parameters. *Elektronnyy zhurnal "Trudy MAI"*. 2010;37. Available from: https://trudymai.ru/upload/iblock/f49/primenenie_metoda_differentsialnoy-evolyutsii-dlya-optimizatsii-parametrov-aerokosmicheskikh-sistem.pdf [Accessed 23th June 2023].
29. Feoktistov V. Differential evolution. *Search of solutions*. Berlin/Heidelberg: Springer; 2006, vol. 5. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-36896-2>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Якубовский Дмитрий Викторович,

К.Т.Н.,

младший научный сотрудник Лаборатории
надёжности топливо- и энергоснабжения № 32,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
СО РАН,

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

✉ yakubovskii.dmit@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8331-6200>**Крупенёв Дмитрий Сергеевич,**

К.Т.Н.,

старший научный сотрудник,
заведующий Лабораторией
надёжности топливо- и энергоснабжения № 32,
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>**Бояркин Денис Александрович,**

К.Т.Н.,

младший научный сотрудник Лаборатории
надёжности топливо- и энергоснабжения № 32,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
СО РАН,

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

denisboyarkin@isem.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7048-2848>**Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку
публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.*

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 23.05.2023 г.; одобрена
после рецензирования 20.06.2023 г.; принята к публи-
кации 18.07.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitrii V. Yakubovskii,

Cand. Sci. (Eng.),

Junior Researcher of the Fuel and Energy Supply
Reliability Laboratory No. 32,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

✉ yakubovskii.dmit@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8331-6200>**Dmitry S. Krupenev,**

Cand. Sci. (Eng.),

Senior Researcher,
Head of the Fuel and Energy Supply Reliability Laboratory
No.32,

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,

130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

krupenev@isem.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3093-4483>**Denis A. Boyarkin,**

Cand. Sci. (Eng.),

Junior Researcher of the Fuel and Energy Supply
Reliability Laboratory No. 32,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

denisboyarkin@isem.irk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7048-2848>**Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 23.05.2023; approved after
reviewing 20.06.2023; accepted for publication 18.07.2023.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 669.713

EDN: XSJSFU

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-139-148



Разработка технологии извлечения золота из хвостов обогащения полиметаллических руд

А.О. Василькова^{1✉}, А.В. Бывальцев², О.Д. Хмельницкая³, Г.И. Войлошников⁴

¹⁻⁴АО «Иргиредмет», г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель – разработка рациональной технологии переработки хвостов флотации медно-цинковой руды с целью извлечения золота с использованием ультранизких (10–30 мг/дм³) концентраций NaCN. Для изучения вещественного состава исходного материала применяли методы пробирно-атомно-абсорбционного, атомно-эмиссионного с индуктивно-связанной плазмой и рентгеноструктурного анализов. Концентрацию NaCN в растворе определяли титриметрическим и фотометрическим методами, pH – потенциометрическим методом анализа. На стадии лабораторных исследований определены оптимальные условия цианирования лежалых хвостов флотационного обогащения медно-цинковой руды, прошедших предварительную известковую обработку: массовая доля класса минус 0,071 мм – 70,5%, продолжительность – 8 ч, расход NaCN – 0,3 кг/т (при концентрации 30 мг/дм³), Ж:Т=1:1. Показано, что при данных условиях извлечение золота составило 32,0–33,6%. Доизмельчение хвостов флотации до крупности 90% класса минус 30 мкм обеспечивает повышение извлечения золота до 41,5–44,7% при расходе NaCN 0,6 кг/т той же концентрации и Ж:Т=1,5:1. На основании полученных результатов проведены укрупненно-лабораторные испытания по цианированию лежалых хвостов по двум вариантам (на хвостах исходной крупности и на доизмельченных), которые подтвердили показатели, полученные на лабораторной стадии. Установлено, что вариант с предварительным измельчением хвостов обогащения на данном этапе представляется экономически нецелесообразным ввиду высоких расходов NaCN (0,6 кг/т против 0,3 кг/т) и активного хлора (5,6 кг/т против 1,2 кг/т). По результатам проведенных опытно-промышленных испытаний на пробе хвостов флотации, поступающих с золотоизвлекательной фабрики, массой 67 т (с содержанием Au 1,35 г/т) извлечение золота составило 31,9% при расходе NaCN 0,135 кг/т. По результатам проведенных технологических исследований рекомендована принципиальная схема извлечения золота из хвостов флотации медно-цинковой руды на основе применения ультранизких концентраций цианида натрия. Ожидаемая прибыль составит 1276,74 млн руб/год, рентабельность – 88% (при сроке окупаемости 1,4 г).

Ключевые слова: полиметаллические руды, техногенное сырье, золото, медь, цианид натрия, хвосты флотации

Для цитирования: Василькова А.О., Бывальцев А.В., Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И. Разработка технологии извлечения золота из хвостов обогащения полиметаллических руд // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 139–148. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-139-148>. EDN: XSJSFU.

METALLURGY

Original article

A technology for gold extraction from tailings resulting from polymetallic ore beneficiation

Anastasia O. Vasilkova^{1✉}, Alexander V. Byvaltsev², Olga D. Khmel'nitskaya³, Grigoriy I. Voiloshnikov⁴

¹⁻⁴Irgiredmet JSC, Irkutsk, Russia

Abstract. We propose a technology for processing of copper-zinc ore flotation tailings with the purpose of extracting gold using ultra-low (10–30 mg/dm³) concentrations of NaCN. The material composition of the starting materials was examined using the methods of inductively coupled plasma, gold assay atomic absorption and X-ray diffraction analysis. The NaCN concentration in solution was determined by titrimetric and photometric methods; pH levels were determined by potentiometric analysis. The laboratory studies established optimal conditions for cyanidation of tailings resulting from flotation beneficiation of copper-zinc ores, which underwent preliminary lime treatment: mass fraction of the 0.071-mm mesh minus – 70.5%; duration – 8 h; NaCN consumption – 0.3 kg/t (at a concentration of 30 mg/dm³); L:S = 1:1. Under these conditions, the gold extraction rate amounted to 32.0–33.6%. Pre-grinding of flotation tailings to the size of 90% of

the 30 μm mesh minus led to an increase in gold extraction of up to 41.5–44.7% at an NaCN consumption of 0.6 kg/t of the same concentration and L:S =1.5:1. The results obtained served as the basis for experimental cyanidation of waste tailings according to two schemes, i.e., using tailings of initial coarseness and pre-ground tailings. A good agreement was achieved between the laboratory and experimental results. At present, the use of pre-ground tailings seems unreasonable economically, due to high costs of NaCN (0.6 kg/t vs 0.3 kg/t) and active chlorine (5.6 kg/t vs 1.2 kg/t). According to pilot tests on a flotation tailing sample weighing 67 t (with an Au content of 1.35 g/t), the gold extraction level was 31.9% at an NaCN consumption rate of 0.135 kg/t. As a result, we propose a technology of gold extraction from flotation tailings of copper-zinc ore based on the application of ultra-low concentrations of NaCN. The expected profit can amount to 1276.74 mln RUB per year, with the economic efficiency of 88% and the payback period of 1.4 years).

Keywords: polymetallic ores, technogenic raw materials, gold, copper, sodium cyanide, flotation tailings

For citation: Vasilkova A.O., Byvaltsev A.V., Khmel'nitskaya O.D., Voiloshnikov G.I. A technology for gold extraction from tailings resulting from polymetallic ore beneficiation. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):139-148. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-139-148>. EDN: XSJSFU.

ВВЕДЕНИЕ

На предприятиях Российской Федерации переработка медно-цинковых руд осуществляется флотационным методом с получением медного и цинкового концентратов с отправкой их на пирометаллургические заводы для извлечения ценных компонентов. При этом выход хвостов обогащения составляет порядка 80% от общего объема перерабатываемой руды [1–3].

За годы эксплуатации одного из предприятий Российской Федерации по переработке такого типа руд в хвостохранилище накоплено более 150 млн т лежалых хвостов, содержащих более 170 тыс. т меди (0,15–0,25%), 160 тыс. т цинка (0,20–0,28%), более 240 т золота (1,2 г/т) и более 2400 т серебра (10–20 г/т). Следовательно, данное хвостохранилище можно отнести к крупному техногенному месторождению, содержащему золото, т.к. стоимость данного металла кратно выше стоимости остальных металлов⁵ [4–10].

На основании вышесказанного были проведены исследования по разработке рациональной технологии извлечения золота из медно-цинковых хвостов флотации с содержанием ценных компонентов: Au – 1,2–1,3 г/т; Ag – 8–16 г/т; Cu – 0,11–0,13%; Zn – 0,21–0,30%; Fe_{сульф} – 23–24%; S_{сульф} – 24–28%. Массовая доля класс минус 0,071 мм в исходной пробе хвостов составила 70,5%.

Для изучения вещественного состава исходного материала применяли методы пробирно-атомно-абсорбционного (ICE 3300 фирмы Thermo Scientific, Англия), атомно-эмиссионного с индуктивно-связанной плазмой (ICAP-6300 Duo фирмы Thermo Scientific, Англия) и рентгеноструктурного (XRD-600 фирмы

Shimadzu, Япония) анализа. По данным минералогического анализа основными минералами являются, % масс.: пирит (51), кварц (24), гидрослюдистые образования и хлорит (11), плагиоклазы (5), гипс (4), гидроксиды железа (3), сульфаты железа (1). Доля халькопирита составляет 0,3%, сфалерита – 0,2%. Согласно данным рационального анализа в сырье в цианируемой форме находится ~ 34% золота, в виде вкраплений в сульфидах ~ 61%, что является главной причиной упорности данного сырья к цианированию [10–12].

В стоимостном выражении основная ценность хвостов флотации связана с золотом, поэтому основное внимание в статье посвящено этому компоненту. Извлечение других компонентов является попутной задачей, в частности, извлечение меди и цинка возможно из растворов отмывки исходных хвостов перед цианированием и требует отдельного рассмотрения.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ранее в ходе проведенных лабораторных исследований, проведенных с целью оценки эффективности извлечения золота из лежалых медно-цинковых хвостов флотации различными обогатительными, пиро- и гидрометаллургическими способами были получены следующие результаты [10, 13–18].

Так, гравитационный способ обогащения (грохочение, обесшламливание в гидроциклоне, обогащение на концентрационном столе, магнитно-жидкостная сепарация) оказался неэффективным. Были получены бедные концентраты с содержанием Au 1,6–2,3 г/т, в которые извлекалось не более 30% данного драгоценного металла.

⁵Леонтьева Е.В. Разработка технологии извлечения золота, серебра химической переработкой лежалых хвостов флотации медно-цинковых колчеданных руд: дис. ... канд. наук: 25.00.13. Магнитогорск, 2017. 156 с.

Флотационное обогащение также показало неудовлетворительные результаты по концентрированию золота: извлечение золота в концентраты находилось на уровне 72,3–82,8% при выходе 59,73–64,1%. Содержание металла в полученных продуктах составило 1,5–2,0 г/т.

Исследованы различные варианты комбинированной пиро-гидрометаллургической переработки хвостов флотации [10]. Изучена добавка реагентов (Na_2CO_3 , CaO , NaCl , NaNO_3 и H_2SO_4) при обжиге и влияние температуры в диапазоне 200–600°C. Огарок подвергали водной отмывке и цианированию. В бескислородном режиме не наблюдалось окисления сульфидов и повышения извлечения ценных компонентов. После окислительного обжига в раствор при последующей гидрометаллургической обработке извлеклось, %: 27,2–32,1 Cu; 24,8–34,5 Zn; 67,1–70,4 Au; 72,7–74,5 Ag. Степень окисления сульфидной серы составила 50%. При этом следует учитывать, что пиритный концентрат характеризуется низким содержанием Au и Cu и высоким расходом продукта, направляемого на обжиг, а также необходимо использовать дорогостоящие аппараты, в том числе для очистки пылегазовых выбросов и утилизации образующихся отходов [10]. Таким образом, можно сделать вывод, что данная технология вряд ли будет рентабельной.

На предварительно отмытых от цветных металлов хвостах проведены тестовые опыты по прямой гидрометаллургической переработке исследуемого сырья с использованием различных растворителей ($\text{CS}(\text{NH}_2)_2$, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, Na_2SO_3 , NaCN) (табл. 1) [19].

Цианирование оказалось наиболее эффективным способом извлечения золота и серебра из хвостов флотации [7]. Концентрацию цианида натрия в растворе определяли титриметрическим и фотометрическим методом, pH – потенциометрическим методом анализа. При расходе NaCN 1,0 кг/т (концентрация NaCN – 0,5 г/дм³) и Ж:Т=1:1 извлечение золота составило 32,0%, серебра – 34,2%. При проведении экспериментов в течение 12 ч и Ж:Т=1:1 по выбору оптимального режима цианирования было установлено, что выщелачивание возможно проводить при ультранизкой концентрации цианида натрия 30 мг/дм³ и его расходе 0,3 кг/т, практически без снижения показателя извлечения золота [20] (32–33%). Также применение ультранизкой концентрации цианида натрия (30 мг/дм³) при цианировании хвостов обогащения снижает динамику извлечения меди в раствор (с 15 до 8%), что свидетельствует о повышении селективности извлечения золота при использовании растворов с ультранизкой концентрацией цианистого натрия. Однако при этом серебро практически не выщелачивается, а дополнительно затраченный NaCN не окупается извлеченным серебром.

Проведенные опыты по определению зависимости показателя извлечения золота от крупности измельчения хвостов обогащения показали, что измельчение продукта до крупности 90% класса минус 30 мкм позволяет повысить извлечение золота до 41,0% при расходе NaCN – 0,8 кг/т [7]. Дальнейшее измельчение до крупности 20, 15, 10 и 5 мкм

Таблица 1. Результаты экспериментов по выщелачиванию Au и Ag из хвостов обогатительной фабрики
Table 1. Test results on gold and silver leaching from mill tailings

Параметры и показатели		Значения			
Тип растворителя благородных металлов		$\text{CS}(\text{NH}_2)_2$, тиокарбамид	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, тиосульфат натрия	Na_2SO_3 , сульфит натрия	NaCN , цианид натрия
Расход реагентов (включая предварительную обработку), кг/т		H_2SO_4 – 85 $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ – 60 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ – 15	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ – 150 Na_2SO_3 – 50 CuSO_4 – 10 NH_4OH – 47	Na_2SO_3 – 500	NaCN – 1,0 CaCO_3 – 20 CaO – 8
Ж:Т при выщелачивании		3:1	5:1	10:1	1:1
Продолжительность выщелачивания, ч		24	24	48	24
Концентрация компонентов в жидкой фазе хвостов, мг/дм ³	Au	0,068	0,096	0,043	0,34
	Ag	2,13	0,76	0,27	3,15
Содержание компонентов в твердой фазе хвостов, г/т	Au	1,09	0,96	0,81	0,83
	Ag	11,6	12,9	13,8	10,0
Извлечение компонентов, %	Au	10,7	21,3	33,6	32,0
	Ag	23,7	15,1	9,2	34,2

повышает извлечение золота (до 49,6%), но при этом увеличивается расход NaCN (до 1,5 кг/т).

На основании проведенных опытов выбраны оптимальные условия цианирования хвостов обогащения, которые были испытаны в укрупненно-лабораторном масштабе:

– для исходной крупности: Ж:Т = 1:1, концентрация NaCN – 30 мг/дм³, расход NaCN 0,3 кг/т, pH 10,5–11,0, продолжительность 8 ч. В этих условиях извлечение золота – 32,0–33,6% (вариант № 1);

– для хвостов, измельченных до 30 мкм: Ж:Т=1,5:1, концентрация NaCN – 30 мг/дм³, расход NaCN – 0,6 кг/т, продолжительность – 8 ч. В этих условиях извлечение золота составит 41,5–44,7% (вариант № 2).

УКРУПНЕННО-ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Укрупненно-лабораторные испытания проводили на пробе лежалых хвостов обогащения, которую предварительно подвергали водной отмывке (при Ж:Т=4:1) с последующей

нейтрализацией растворов после отмывки (расход CaCO₃ – 19 кг/т, CaO – 9 кг/т). Испытания включали операции предварительного и сорбционного цианирования с применением активного угля марки JX-102 (табл. 2). Полученные хвосты сорбционного цианирования направляли на обезвреживание.

Для обезвреживания хвостов цианирования предложен вариант противоточной декантационной отмывки пульпы с хлорированием промвод. Для хвостов цианирования исходной крупности расход реагентов составил: гипохлорит кальция (в пересчете на «активный хлор») – 1,2 кг/т; CaO – 0,3 кг/т; флокулянт – 15 г/т [18]. Для доизмельченных хвостов: «активный хлор» – 5,6 кг/т; CaO – 0,4 кг/т; флокулянт – 60 г/т [19].

Укрупненные испытания подтвердили результаты лабораторных исследований по цианированию лежалых хвостов обогатительной фабрики при ультранизкой концентрации цианида натрия. Извлечение золота из хвостов исходной крупности составило 31,5%, из доизмельченных хвостов до 30 мкм – 42,0% при

Таблица 2. Результаты укрупненно-лабораторных динамических испытаний по цианированию хвостов обогатительной фабрики

Table 2. Results of large-scale dynamic laboratory tests on mill tailings cyanidation

Параметры и показатели	Значения	
	Вариант № 1	Вариант № 2
ИЗВЕСТКОВАЯ ОБРАБОТКА		
Содержание Au в исходных хвостах, г/т	1,24	
Исходная крупность	75% минус 71 мкм	90% минус 30 мкм
Ж:Т	1,0	1,5
Конечное значение pH	12,0	11,9
Расход CaO, кг/т	8,0	8,0
ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЦИАНИРОВАНИЕ		
Продолжительность цианирования, ч	12,6	
в том числе: предварительного	4,2	
сорбционного	8,4	
Расход NaCN, кг/т	0,3	0,6
Концентрация Au в хвостах предварительного цианирования, мг/дм ³	0,33	0,30
Содержание Au в твердой фазе хвостов предварительного цианирования, г/т	0,92	0,83
Извлечение Au в раствор на стадии предварительного цианирования, %	25,8	33,1
СОРБЦИОННОЕ ЦИАНИРОВАНИЕ		
Концентрация Au в жидкой фазе хвостов сорбционного цианирования, мг/дм ³	0,009	0,006
Содержание Au в регенерированном угле, мг/г	0,05	
Содержание Au в насыщенном угле, мг/г	0,36	0,34
Концентрация сорбента в пульпе, г/дм ³	20–30	
Содержание Au в твердой фазе хвостов сорбционного цианирования, г/т	0,84	0,71
Извлечение Au на сорбент, %	31,5	42,0

расходе NaCN 0,3 и 0,6 кг/т (концентрация NaCN – 30 мг/дм³) соответственно. Емкость насыщенного угля по золоту составила 0,34–0,36 мг/г.

Однако на основании полученных результатов сделан вывод, что вариант с предварительным бисерным измельчением хвостов обогащения на данном этапе представляется экономически нецелесообразным ввиду высокого расхода цианида натрия (0,6 кг/т против 0,3 кг/т) и активного хлора (5,6 кг/т против 1,2 кг/т). При этом доизвлеченное золото (0,14 г/т) не окупит дополнительных затрат на реагенты.

ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Кроме лежалых хвостов обогащения, на предприятии имеются текущие хвосты, получаемые при флотации медно-цинковых руд. С целью проверки и отработки технологии цианирования на основе применения ультранизких концентраций цианида натрия для данных

текущих хвостов обогащения проведены опытно-промышленные испытания на пробе материала массой 67 т с содержанием Au – 1,35 г/т.

Схема проведения опытно-промышленных испытаний практически соответствует схеме укрупненно-лабораторных испытаний для переработки лежалых хвостов обогащения. Отличием является исключение из схемы операции водной отмывки и нейтрализации карбонатом кальция хвостов обогащения, так как текущие хвосты имели pH 6,8. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Расход NaCN (100%) составил 0,135 кг/т, концентрация цианида натрия в растворе – 10–30 мг/дм³. Снижение расхода NaCN с 0,3 кг/т до 0,135 кг/т обусловлено переработкой текущих хвостов, которые отличаются по вещественному составу от лежалых хвостов обогащения. Извлечение золота на сорбент составило 31,9% или 0,43 г/т, потери с жидкой фазой

Таблица 3. Сводные результаты опытно-промышленных испытаний технологии цианирования хвостов медно-цинковой флотации

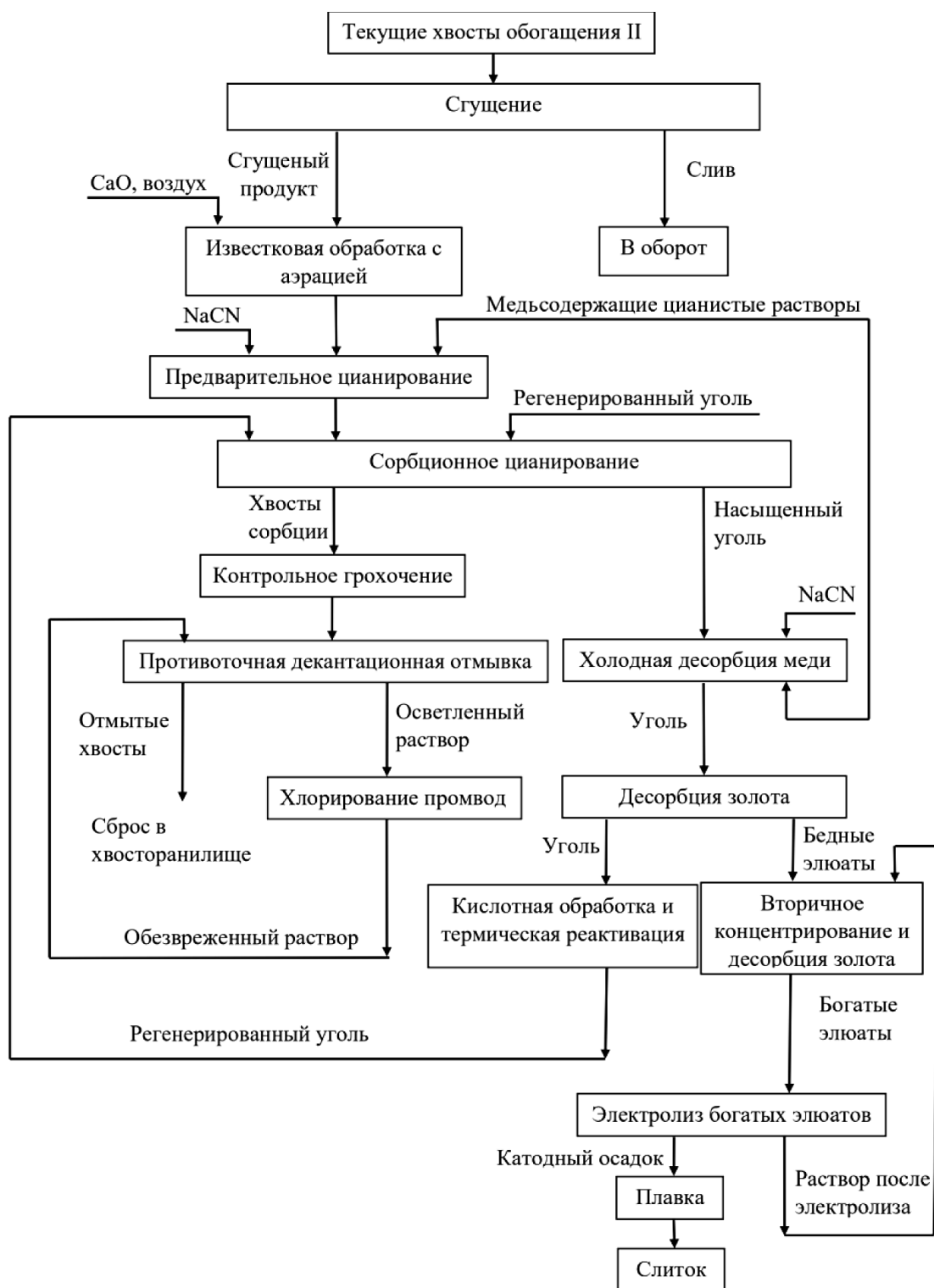
Table 3. Summary results of pilot tests on copper-zinc flotation tailings cyanidation technology

Параметры и показатели		Значения
ИЗВЕСТКОВАЯ ОБРАБОТКА		
Содержание Au в продукте, поступающем на переработку, г/т		1,35
Крупность продукта		75% минус 71 мкм
Массовая доля твердого в пульпе		50,8
Продолжительность известковой обработки, ч		15
Конечное значение pH		11,2
Расход 100%-го CaO, кг/т		3,6
ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЦИАНИРОВАНИЕ		
Продолжительность предварительного цианирования, ч		4
Расход NaCN, кг/т		0,135
Концентрация компонентов в жидкой фазе хвостов предварительного цианирования (питания сорбции), мг/дм ³	NaCN	10–30
	Au	0,31
	Cu	10,1
Содержание Au в твердой фазе хвостов предварительного цианирования, г/т		0,97
Извлечение Au в раствор на операции предварительного цианирования, %		28,0
СОРБЦИОННОЕ ЦИАНИРОВАНИЕ		
Продолжительность сорбционного цианирования, ч		8
Концентрация компонентов в жидкой фазе хвостов сорбционного цианирования, мг/дм ³	NaCN	<5
	Au	0,01
	Cu	1,28
	SCN ⁻	50,6
Содержание Au в регенерированном сорбенте, мг/г		0,043
Содержание компонентов в насыщенном сорбенте, мг/г	Au	0,30
	Cu	3,7
Концентрация сорбента в пульпе, г/дм ³		25–30
Содержание Au в твердой фазе хвостов сорбционного цианирования, г/т		0,91
Суммарные потери золота с хвостами, г/т		0,92
Извлечение Au на сорбент, %	%	31,9
	г/т	0,43

пульпы – $<0,01 \text{ мг/дм}^3$, емкость насыщенного угля по золоту – $0,30 \text{ мг/г}$, по меди – $3,7 \text{ мг/г}$.

Для переработки насыщенного угля рекомендована технология, включающая предварительное обезмеживание, автоклавно-щелочную десорбцию, вторичное концентрирование и электроосаждение золота [18].

По результатам проведенных экспериментов нами рекомендована принципиальная схема извлечения золота из хвостов обогащения полиметаллических руд на основе применения ультранизких концентраций цианида натрия (рисунок).



Принципиальная схема переработки текущих хвостов обогащения
Schematic flowsheet of current concentration tailings processing

Проведенный укрупненный технико-экономический расчет предлагаемой технологии при стоимости золота 4182 руб/г (актуально на 10.01.23) показал, что переработка хвостов флотации медно-цинковых руд с применением ультранизких концентраций цианида натрия является экономически привлекательной. Ожидаемая прибыль составит 1276,74 млн руб/год, рентабельность – 88%, при сроке окупаемости 1,4 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали перспективность технологии переработки медно-цинковых хвостов флотации с использо-

ванием ультранизких концентраций цианида натрия. Разработанная технология открывает перспективы для промышленной реализации технологии цианирования текущих хвостов обогатительной фабрики. Учитывая, что при переработке полиметаллических (медно-цинковых) руд извлечение золота в кондиционный медный и цинковый концентраты находится на уровне 15–25%, вовлечение в переработку хвостов флотации позволит дополнительно извлечь 30–31% золота, тем самым повысить сквозное извлечение благородного металла из полиметаллических руд до 50%, что является приемлемым показателем для данного типа сырья.

Список источников

1. Чантурия В.А., Шадрюнова И.В. Технология обогащения медных и медно-цинковых руд Урала. М.: Наука, 2016. 387 с.
2. Каплунов Д.Р. Комплексное освоение недр комбинированными геотехнологиями. М.: ООО «Недра – XXI», 2010. 304 с.
3. Aylmore M.G., Jaffer A. Evaluating process options for treating some refractory ores // ALTA 2012 International Gold Conference (Perth, 31 May – 1 June 2012). Perth, 2012. P. 249. <https://doi.org/10.13140/2.1.4325.9842>.
4. Васильев Е.А., Рудой Г.Н., Савин А.Г. Перспективы переработки лежалых хвостов обогащения ОАО «Гайский ГОК» // Цветные металлы. 2014. № 10. С. 25–28. EDN: SQVRFH.
5. Иванников С.И., Эпов Д.Г., Крысенко Г.Ф., Медков М.А., Братская С.Ю., Юдаков А.А. Комплексный подход к извлечению золота из техногенных объектов золотодобычи Дальнего Востока России // Вестник Отделения наук о Земле Российской академии наук. 2013. Т. 5. С. NZ1001. <https://doi.org/10.2205/2013NZ000115>.
6. Волюнкина Е.П. Анализ состояния проблем переработки техногенных отходов в России // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. Экология и рациональное природопользование. 2017. № 2. С. 43–49. EDN: YTOUCP.
7. Василькова А.О., Васильков Н.В., Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И. Анализ современного состояния способов переработки техногенного сырья // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 1. С. 97–107. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-97-107>. EDN: BZWSCB.
8. Федоров С.А., Амдур А.М., Малышев А.Н., Каримова П.Ф. Обзор техногенных и вторичных золотосодержащих отходов и способов извлечения из них золота // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 11-1. С. 346–365. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_111_0_346. EDN: KGUTFK.
9. Медяник Н.Л., Леонтьева Е.В., Мишурина О.А., Муллина Э.Р. Лежалые хвосты флотации медно-колчеданных руд извлечения золота и серебра: анализ ресурсного потенциала // Вестник ЗабГУ. 2021. Vol. 27. № 6. С. 31–39. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-6-31-39>. EDN: FCIRVK.
10. Бывальцев А.В., Хмельницкая О.Д., Дементьев В.Е., Шарипов Р.Х., Гибадуллин З.Р., Васильев Е.А. [и др.]. Цианидная технология извлечения золота из хвостов Учалинской обогатительной фабрики // Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья: материалы Междунар. науч.-техн. конф., приуроченной к 90-летию со дня основания института «Уралмеханобр» (г. Екатеринбург, 6–8 ноября 2019 г.). Екатеринбург, 2019. С. 409–412. EDN: EQUFPI.
11. Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Чантурия Е.Л., Юшина Т.И., Хачатрян Л.С., Дунаева В.Н. О выборе возможных способов комплексного использования техногенных пиритных хвостов в связи с их переработкой // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 10. С. 92–99. EDN: UQFPHV.
12. Мусаев В.В., Ключников А.М., Галимов Р.Р. Исследование по доизвлечению металлов из хвостов флотационного обогащения медных колчеданных руд // Бутлеровские сообщения. 2019. № 2. Т. 57. С. 50–58. <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/19-57-2-50>. EDN: YZJGVF.
13. Feng D., Van Deventer J.S.J. Ammonical thiosulfate leaching of gold in the presence of pyrite // Hydrometallurgy. 2006. Vol. 82. Iss. 3-4. P. 126–132. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.006>.
14. Kondrat'eva T.F., Pivovarova T.A., Bulaev A.G., Melamud V.S., Muravyov M.I., Usoltsev A.V., et al. Percolation bioleaching of copper and zinc and gold recovery from flotation tailings of the sulfide complex ores of the Ural region, Russia // Hydrometallurgy. 2012. Vol. 111-112. P. 82–86. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.10.007>.
15. Medyanik N.L., Leont'eva E.V., Mullina E.R., Mishurina O.A. Mechanism of thermochemical interaction between old copper ore flotation tailings and chlorammonium reagents // Journal of Mining Science. 2020. Vol. 56. P. 457–463. <https://doi.org/10.1134/S106273912003674X>.
16. Котов Ю.А., Филатов А.Л., Корнежевский С.Р. [и др.]. Комплексная переработка золотосодержащих пиритных хвостов Учалинской обогатительной фабрики // Проблемы геологии и разведки месторождений золота, извлечения

благородных металлов из руд и отходов производства: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (г. Екатеринбург, 1999 г.). Екатеринбург, 1999. С. 90–91.

17. Сенченко А.Е., Аксенов А.В., Васильев А.А., Середкин Ю.Г. Глубокое атмосферное окисление сульфидных золотосодержащих концентратов по технологии «Альбион» // Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения 2015): материалы Междунар. совещания (г. Иркутск, 21–26 сентября 2015 г.). Иркутск: ООО «Полиграфический центр «РИЭЛ», 2015. С. 331–334.

18. Бывальцев А.В., Шарипов Р.Х., Васильев Е.А., Рудой Г.Н. Разработка рациональной технологии извлечения золота из хвостов Учалинской обогатительной фабрики // Обогащение руд. 2019. № 5. С. 46–51. <https://doi.org/10.17580/or.2019.05.09>. EDN: FPDZIA.

19. Vasilkova, A., Byvaltsev A., Khmel'nitskaya O., Voyloshnikov G., Petrov S., Vasilyev E. Development and pilot plant testing of gold recovery technology from polymetallic ore flotation tailings // World Gold 2023 – conference proceedings (Shenyang, 4–7 September 2023). Shenyang, 2023. P. 818–825.

20. Василькова А.О., Бывальцев А.В., Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И. Оценка возможности переработки техногенного сырья с применением ультразвуковых концентраций цианистого натрия // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 5. С. 1105–1112. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1105-1112>. EDN: KKWRFH.

References

1. Chanturiya V.A., Shadrunkova I.V. *Concentration technologies for the Urals copper and copper-zinc ores*. Moscow: Nauka; 2016, 387 p. (In Russ.).

2. Kaplunov D.R. *Subsoil integrated development using combined geotechnologies*. Moscow: Nedra - XXI; 2010, 304 p. (In Russ.).

3. Aylmore M.G., Jaffer A. Evaluating process options for treating some refractory ores. In: *ALTA 2012 International Gold Conference*. 31 May – 1 June 2012, Perth. Perth; 2012, p. 249. <https://doi.org/10.13140/2.1.4325.9842>.

4. Vasil'ev E.A. Processing prospects for mature tailings of OJSC Gaisky Concentration Mill. *Tsvetnye metally*. 2014;10:25–28. (In Russ.). EDN: SQVRFH.

5. Ivannikov S.I., Epov D.G., Krysenko G.F., Medkov M.A., Bratskaya S.Yu., Yudakov A.A. An integrated approach to gold recovery from technogenic gold mining sites in the Russian Far East. *Vestnik Otdeleniya nauk o Zemle RAN*. 2013;5:NZ1001. (In Russ.). <https://doi.org/10.2205/2013NZ000115>.

6. Volynkina E.P. *Analysis of the state of technogenic waste processing problems in Russia*. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta. Ekologiya i racional'noe prirodopol'zovanie = Bulletin of the Siberian State Industrial University. Ecology and environmental management*. 2017;2:45–58 (In Russ.). EDN: YTOUCP.

7. Vasilkova A.O., Vasilkov N.V., Khmel'nitskaya O.D., Voyloshnikov G.I. Analysis of the current state of technologies in the field of recycling technogenic gold-containing raw materials. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(1):97–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-97-107>

8. Fedorov S.A., Amdur A.M., Malyshev A.N., Karimova P.F. Industrial and secondary gold-bearing waste and gold recovery techniques: review. *GIAB. Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten'*. 2021;11-1:346–365. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_111_0_346. EDN: KGUTFK.

9. Medyanik N.L., Leontyeva E.V., Mishurina A.O., Mullina E.R. Stale tailings of flotation of copper-crustured ores flotation with the possibility of gold and silver selective extraction: resource potential analysis. *Vestnik ZabGU = Bulletin of ZabSU*. 2021;27(6):31–39 (In Russ.). <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-6-31-39>. EDN: FCIRVK.

10. Byvaltsev A.V., Khmel'nitskaya O.D., Dement'ev V.E., Sharipov R.Kh., Gibadullin Z.R., Vasilyev E.A., et al. Cyanide technology for gold recovery from Uchalinsky concentration plant tailings. In: *Sovremennye tendencii v oblasti teorii i praktiki dobychi i pererabotki mineral'nogo i tekhnogennogo syr'ya: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, priurochennoj k 90-letiyu so dnya osnovaniya instituta «Uralmekhanobr» = Modern trends in the field of theory and practice of mining and processing of mineral and technogenic raw materials: Materials of the international scientific and technical conference dedicated to the 90th anniversary of the founding of the Uralmekhanobr Institute*. 6–8 November 2019, Ekaterinburg. Ekaterinburg; 2019, p. 409–412. (In Russ.). EDN: EQUFPI.

11. Bocharov V.A., Ignatkina V.A., Chanturia E.L. Choice of method for integrated utilization of pyrite tailings after processing. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2015;10:92–98. (In Russ.).

12. Musayev V.V., Klyushnikov A.M., Galimov R.R. Study on the extraction of metals from tails of flotation enrichment of copper sulfide ores // *Butlerov Communications*. 2019;57(2):50–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/19-57-2-50>. EDN: YZJGVF.

13. Feng D., Van Deventer J.S.J. Ammonical thiosulfate leaching of gold in the presence of pyrite. *Hydrometallurgy*. 2006;82(3-4):126–132. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.006>.

14. Kondrat'eva T.F., Pivovarova T.A., Bulaev A.G., Melamud V.S., Muravyov M.I., Usoltsev A.V., et al. Percolation bioleaching of copper and zinc and gold recovery from flotation tailings of the sulfide complex ores of the Ural region, Russia. *Hydrometallurgy*. 2012;111-112:82–86. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.10.007>.

15. Medyanik N.L., Leont'eva E.V., Mullina E.R., Mishurina O.A. Mechanism of thermochemical interaction between old copper ore flotation tailings and chlorammonium reagents. *Journal of Mining Science*. 2020;56:457–463. <https://doi.org/10.1134/S106273912003674X>.

16. Kotov Yu.A., Filatov A.L., Kornezhevsky S.R., et al. Integrated processing of gold-bearing pyrite tailings from the Uchalinsky concentration plant. In: *Problemy geologii i razvedki mestorozhdenij zolota, izvlecheniya blagorodnyh metallov iz rud i othodov proizvodstva: materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = Problems of gold deposit geology and exploration, extraction of precious metals from ores and production wastes: materials of the International scientific and technical conference*. 1999, Ekaterinburg. Ekaterinburg; 1999, p. 90-91. (In Russ.).
17. Senchenko A.E., Aksenov A.V., Vasilyev A.A., Seredkin Yu.G. Deep atmospheric oxidation of sulfide gold-containing concentrates using the Albion technology. In: *Sovremennye processy kompleksnoj i glubokoj pererabotki trudnoobogatimogo mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya 2015): materialy mezhdunarodnogo soveshchaniya = Modern processes of integrated and deep processing of refractory minerals*. 21–25 September 2015, Irkutsk. Irkutsk: Poligraficheskij centr "RIEL"; 2015, p. 331-334. (In Russ.).
18. Byvaltsev A.V., Sharipov R.Kh., Vasiliev E.A., Rudoy G.N. Developing a rational technology for gold recovery from the Uchalinsky concentration plant tailings. *Obogashchenie Rud*. 2019;5:46-51. <https://doi.org/10.17580/or.2019.05.09>. (In Russ.). EDN: FPDZIA.
19. Vasilkova A., Byvaltsev A., Khmel'nitskaya O., Voyloshnikov G., Petrov S., Vasilyev E. Development and pilot plant testing of gold recovery technology from polymetallic ore flotation tailings. In: *World Gold 2023 – conference proceedings*. 4–7 September 2023, Shenyang. Shenyang; 2023, p. 818-825.
20. Vasilkova A.O., Byvaltsev A.V., Khmel'nitskaya O.D., Voiloshnikov G.I. Assessing possibility of technogenic raw material processing using ultra-low concentrations of sodium cyanide. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(5):1105-1112. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1105-1112>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Василькова Анастасия Олеговна,
научный сотрудник лаборатории гидрометаллургии,
АО «Иргиредмет»,
664011, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия
✉ anastasiya.perpelkina.94@mail.ru

Бывальцев Александр Владимирович,
к.т.н.,
ведущий научный сотрудник лаборатории
гидрометаллургии,
АО «Иргиредмет»,
664011, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия
torrot_2008@mail.ru

Хмельницкая Ольга Давыдовна,
к.т.н.,
ведущий научный сотрудник лаборатории
гидрометаллургии,
АО «Иргиредмет»,
664011, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия
lab15@irgiredmet.ru

Войлошников Григорий Иванович,
д.т.н., профессор,
заместитель генерального директора
по научно-методической работе
и инновационной деятельности,
АО «Иргиредмет»,
664011, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия
greg@irgiredmet.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anastasia O. Vasilkova,
Researcher of the Hydrometallurgy Laboratory,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Blvd, Irkutsk 664011, Russia
✉ anastasiya.perpelkina.94@mail.ru

Alexander V. Byvaltsev,
Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher of the Hydrometallurgy Laboratory,
38, Gagarin Blvd, Irkutsk 664011, Russia
torrot_2008@mail.ru

Olga D. Khmel'nitskaya,
Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher of the Hydrometallurgy Laboratory,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Blvd, Irkutsk 664011, Russia
lab15@irgiredmet.ru

Grigory I. Voiloshnikov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Deputy Director for Research and Innovation,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Blvd, Irkutsk 664011, Russia
greg@irgiredmet.ru

Вклад авторов

Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И. и Бывальцев А.В. осуществляли научное руководство исследованиями, подбор списка литературных источников по тематике исследования и провели общее редактирование текста рукописи. Василькова А.О. провела эксперименты, расчеты по кинетике и обобщила полученные результаты.

Contribution of the authors

Khmel'nitskaya O.D., Voiloshnikov G.I. and Byvaltsev A.V. supervised the research, selected the literature and compiled the list of references on the research subject as well as edited the text of the article. Vasilkova A.O. conducted experiments, performed kinetic calculations and summarized the results.

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 17.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 28.02.2024 г.; принята к публикации 29.02.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 17.02.2024; approved after reviewing 28.02.2024; accepted for publication 29.02.2024.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 669.66-5:66.935.5

EDN: JOCNFM

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-149-161



Опыт решения проблемы фильтрования и промывки неструктурированных осадков гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама

Н.Л. Мохирева^{1✉}, И.В. Логинова², В.Р. Миролюбов³, А.А. Шопперт⁴¹ООО «Бергауф Строительные Технологии», г. Екатеринбург, Россия²⁻⁴Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Резюме: Цель – выбор конструкции фильтра и режима промывки осадка гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама для минимизации объема промывных вод и получения качественного осадка – прекурсора железоксидного пигмента. Изучение химического состава объекта исследований – пульпы после солянокислой обработки полиметаллического шлама – проводилось методами атомно-абсорбционной спектрофотометрии, рентгенофлуоресцентной спектрометрии, а гранулометрического состава – методом лазерной дифракции. В результате изучения химического состава установлено, что в жидкой фазе содержится, г/дм³: MgCl₂ 90,5–105,6; AlCl₃ 35,8–37,6; NiCl₂ 8,1–9,0; FeCl₃ 24,5–27,1; CrCl₃ 5,9–6,5; MnCl₂ 2,1–2,4; HCl 6,5–7,7. Твердые частицы, содержащиеся в пульпе, представлены двумя выраженными группами частиц со следующими размерами: от 0,1 до 1 мкм и от 1 до 120 мкм. Установлено, что разделение пульпы с использованием модели камерно-мембранного фильтр-пресса с вертикальным расположением плит позволяет минимизировать объем промывных вод до Т:Ж=1:1, вернуть захваченный осадком маточный раствор в технологический цикл и получить качественный промытый осадок с минимальным содержанием остаточных солей (0,5% масс.). Оптимальная температура пульпы, поступающей на фильтрование, соответствует 80°C, температура воды для промывки – 60°C. Установлено, что лимитирующей стадией процесса разделения пульпы является промывка осадка, которая осуществима методом вытеснения при условии использования подкисленной воды с pH 1,5. Определено, что следует использовать фильтровальные салфетки, изготовленные из 100% полипропилена, с удельным весом ткани 540 г/м² ± 10%, воздухопроницаемостью при 200 Па 6 л/дм² в минуту ± 30% и максимальной рабочей температурой не менее 90°C. Таким образом, выполнен расчет удельной производительности фильтр-пресса и выбрана стандартная машина с вертикальным расположением плит и поверхностью фильтрования 500 м² для разделения пульпы после гидрометаллургической переработки 8000 т/год влажного полиметаллического шлама.

Ключевые слова: гидрометаллургия, выщелачивание, фильтрование, шлам, фильтр-пресс, мембрана, скорость фильтрования

Для цитирования: Мохирева Н.Л., Логинова И.В., Миролюбов В.Р., Шопперт А.А. Опыт решения проблемы фильтрования и промывки неструктурированных осадков гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 149–161. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-149-161>. EDN: JOCNFM.

METALLURGY

Original article

Experience in solving the problem of filtering and washing unstructured sediments of hydrometallurgical processing of polymetal sludge

Natalya L. Mokhireva^{1✉}, Irina V. Loginova², Vitaly R. Mirolyubov³, Andrey A. Shoppert⁴¹LLC “Bergauf Construction Technologies”, Ekaterinburg, Russia²⁻⁴Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The article aims to select a filter design and mode of washing cake in the hydrometallurgical processing of polymetallic sludge in order to minimize the volume of washing water and obtain a high-quality cake—iron oxide pigment precursor. An analysis of the chemical composition of the subject matter—pulp following hydrochloric acid treatment of

polymetallic sludge—was performed using atomic absorption spectrophotometry and X-ray fluorescence spectrometry, while the particle size distribution was studied via laser diffraction. The analysis of the chemical composition revealed that the liquid phase contains, g/dm³: MgCl₂ 90.5–105.6; AlCl₃ 35.8–37.6; NiCl₂ 8.1–9.0; FeCl₃ 24.5–27.1; CrCl₃ 5.9–6.5; MnCl₂ 2.1–2.4; HCl 6.5–7.7. The solid particles present in the pulp are represented by two distinct groups of particles having the following sizes: 0.1–1 µm and 1–120 µm. It was found that pulp separation using a chamber-membrane filter-press with the vertical arrangement of plates minimizes washing water volume up to S:L 1:1, returns the mother liquor captured by the cake to the process cycle, and helps to obtain high-quality washed cake with a minimum content of residual salts (0.5 wt%). The optimal temperature of the pulp entering the filtering process is 80°C, while that of washing water is 60°C. Cake washing was shown to be the limiting step of the pulp separation process, which can be realized via the displacement method given the use of acidified water with pH 1.5. It was found necessary to use filter cloths made of 100% polypropylene, with a specific weight of the fabric of 540 g/m² ± 10%, air permeability of 6 L/dm² per minute ± 30% at 200 Pa, and a maximum operating temperature of at least 90°C. Thus, the specific capacity of the filter press was calculated and a standard machine with the vertical arrangement of plates and a filtering surface of 500 m² was selected for pulp separation following hydrometallurgical processing of wet polymetallic sludge (8000 tons/year).

Keywords: hydrometallurgy, leaching, filtering, sludge, filter press, membrane, filtration rate

For citation: Mokhireva N.L., Loginova I.V., Mirolyubov V.R., Shoppert A.A. Experience in solving the issue of filtering and washing unstructured cake in the hydrometallurgical processing of polymetallic sludge. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):149-161. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-149-161>. EDN: JOCNFM.

ВВЕДЕНИЕ

Технологические процессы гидрометаллургии предусматривают необходимость разделения объемных потоков жидких пульп и подготовки воды. Зачастую сложность вызывают эффективность разделения суспензий и промывка осадков ввиду неоптимального содержания твердой взвеси [1, 2], агрессивности разделяемых фаз [3, 4], высоких требований к качеству продуктов фильтрования [5, 6].

Разделение и промывка неструктурированных осадков остаются актуальной проблемой для всей гидрометаллургии [7–11]. Потеря целевого компонента, длительность технологического цикла, отсутствие автоматизации, энергоемкость в ряде случаев не позволяют достичь желаемых экономических показателей, что препятствует реализации технологии глубокой переработки руд на предприятиях цветной и черной металлургии [12–17]. Совершенствование фильтровальных аппаратов и появление новых материалов открывают неисследованные возможности на пути решения задачи разделения сложных суспензий.

Целью обсуждаемого исследования явился выбор конструкции фильтра и режима промывки осадка гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама для минимизации объема промывных вод и получения качественного осадка – прекурсора железистого пигмента.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служила пульпа после гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама (продукта комплексной переработки серпентинита) соляной

кислотой, состоящая из раствора с pH 1,4–1,6 и мелкодисперсной твердой фазы, содержащей в основном оксид-гидроксид железа [18]. Химический состав жидкой фазы представлен хлоридами металлов и свободной соляной кислотой с концентрацией, г/дм³: 90,5–105,6 MgCl₂; 35,8–37,6 AlCl₃; 8,1–9,0 NiCl₂; 24,5–27,1 FeCl₃; 5,9–6,5 CrCl₃; 2,1–2,4 MnCl₂; 6,5–7,7 HCl. Анализ гранулометрического распределения твердых частиц, содержащихся в пульпе (рис. 1), показал наличие полидисперсного осадка с двумя выраженными группами частиц. Первая группа с частицами от 0,1 до 1 мкм, вторая – от 1 до 120 мкм. Размер 90% зерен осадка не превышает 113 мкм. Содержание твердого в пульпе выщелачивания составляло 160–180 г/дм³ в зависимости от степени испарения воды.

Решение поставленной цели достигли путем реализации двух последовательных серий экспериментов с использованием различных установок.

Первую серию экспериментов по изучению процесса фильтрования пульпы от солянокислой переработки полиметаллического шлама проводили с использованием лабораторного вакуум-фильтра, состоящего из воронки Бюхнера и колбы Бунзена, подключенной к лабораторному вакуум-фильтру. Определенное количество подготовленной пульпы после выщелачивания полиметаллического шлама с заданной температурой вводилось в собранный заранее прогретый фильтр. Для исследования процесса фильтрования использовалась усредненная пульпа, полученная в четырех сериях экспериментов по выщелачиванию.

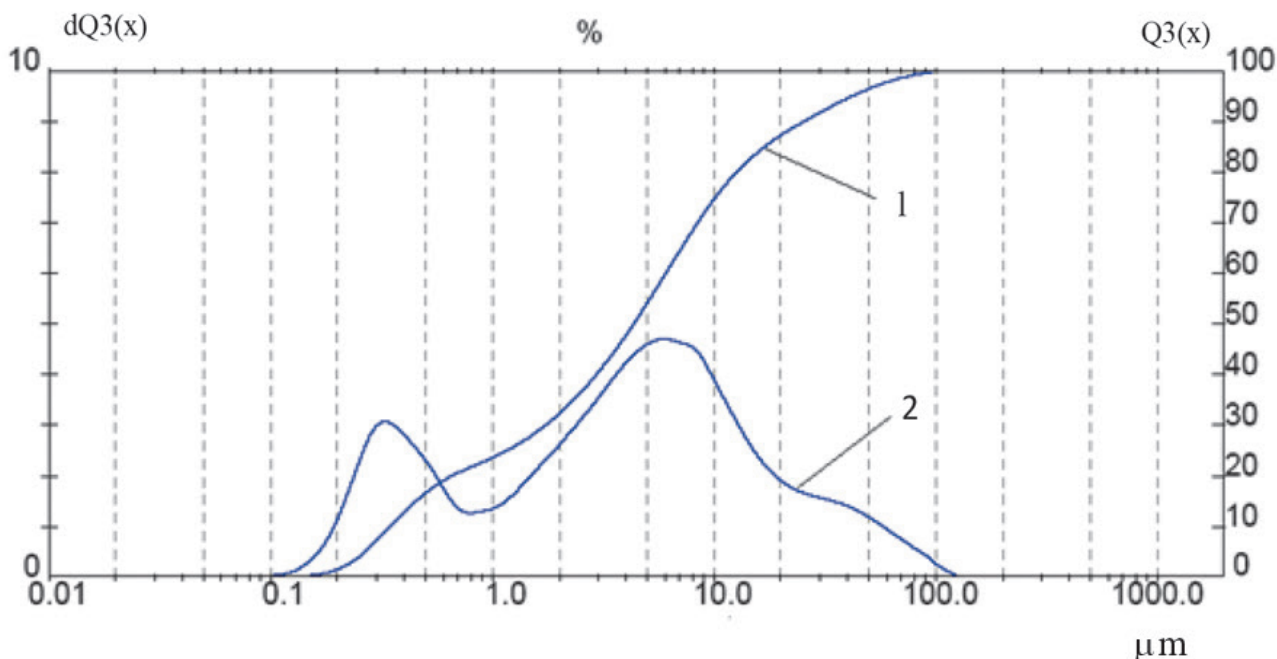


Рис. 1. Гранулометрический состав пульпы, полученной при выщелачивании полиметаллического шлама соляной кислотой, определенный методом лазерной дифракции на анализаторе частиц Analysette 22 Micro Tec plus: 1 – интегральное распределение; 2 – дифференциальное распределение
Fig. 1. Grain size distribution of the pulp obtained by polymetallic sludge leaching with hydrochloric acid that was determined by the laser diffraction method on the Analysette 22 Micro Tec plus particle analyzer: 1 – cumulative distribution; 2 – differential distribution

Методика проведения экспериментов по промывке осадков заключалась в следующем: после окончания процесса фильтрования на поверхность сформированного осадка заливали рассчитанное количество воды, ориентируясь на среднее значение выхода непромытого осадка из исследуемых пульп, полученных в опытах без промывки. Пульпу фильтровали на лабораторном вакуум-фильтре с использованием нескольких марок фильтровальных салфеток при постоянном перепаде давления от 400 до 800 кПа. Все испытуемые образцы тканей (Tamfelt Technical Textiles, Финляндия) были изготовлены на основе полипропиленового волокна, имеющего высокую рабочую температуру и стойкость к растворам кислот. Ткани с артикулом S-2180-L2 и S-1197-L2K2 более плотные, чем образец S-2193-L2K2. В ходе эксперимента оценивали проникновение мельчайших частиц осадка в первые порции фильтрата.

Следует отметить, что определение влажности как полиметаллического шлама, так и осадка после выщелачивания шлама осуществляли с использованием методики, в основе которой заложен весовой метод определения влажности при 105°C. Полученный результат корректировали расчетным путем с учетом

титриметрически определенного количества раствора соли $MgCl_2$, унесенной осадком, и кристаллизационной воды, которую $MgCl_2$ способен связывать с образованием бишофита по реакции $MgCl_2 + 6H_2O = MgCl_2 \cdot 6H_2O$ при высушивании осадка. Таким образом, влажность определялась как частное от суммы значений количества влаги, унесенной при высушивании материала до постоянной массы при 105°C, и влаги, способной связаться с $MgCl_2$ к массе навески влажного материала, вычисленного в процентах. Использование данной методики позволило получить корректные значения содержания воды во влажных и высушенных осадках и исключить противоречивость значений влажности осадков, отмеченную в ранее проведенных исследованиях по комплексной переработке серпентинита [19].

Вторую серию экспериментов проводили на экспериментальной фильтровальной установке (рис. 2) с использованием суспензии, полученной в ходе опытно-промышленного опробования технологии солянокислой обработки полиметаллического шлама. Фильтровальные салфетки изготовили из ткани с артикулом S-2193-L2K2 (100% полипропилен, с удельным весом ткани $540 \text{ г/м}^2 \pm 10\%$, воздухопроницаемостью при 200 Па $6 \text{ л/дм}^2 \text{ в мин} \pm 30\%$ и мак-

симальной рабочей температурой не менее 90°C). Для промывки использовали слабый раствор хлористоводородной кислоты с pH 1,5 для недопущения гидролиза хлоридов металлов, захваченных с маточным раствором.

В рамках данной серии экспериментов необходимо было выяснить следующие вопросы:

- выявление рабочего давления фильтрования в диапазоне до 600 кПа, обеспечивающего приемлемую скорость фильтрования;
- определение условий проведения промывки осадка (давление и расход промывной жидкости, давление подпрессовки мембранами, длительность промывки), обеспечивающих требуемую степень вытеснения из его пор маточного раствора при минимальном разбавлении его промывной жидкостью;
- установление оптимальной толщины отфильтрованного осадка из условий получения максимально возможной производительности фильтр-пресса;
- определение влияния давления отжима отфильтрованного осадка в диапазоне 600–800 кПа и его длительности на влажность осадка;
- расчет рабочей циклограммы эксплуатации фильтр-пресса и его производительности;
- выбор типоразмера и требуемого количества фильтр-прессов.

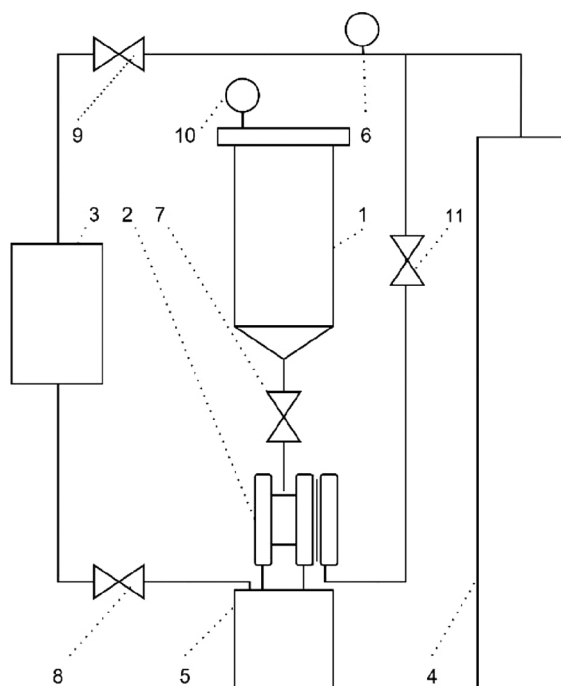


Рис. 2. Экспериментальная фильтровальная установка

Fig. 2. An experimental filtering unit

Экспериментальная фильтровальная установка, моделирующая процессы фильтрования и промывки осадка на фильтр-прессах с вертикальными плитами (рис. 2), содержит вертикальную цилиндрическую емкость 1 для фильтруемой суспензии, оснащенную перемешивающим устройством и греющей рубашкой (на рис. 2 не показаны), фильтрующую ячейку 2, емкость для промывной жидкости 3 и емкость для сбора фильтрата 5. Для управления технологическими операциями установку оснастили запорной арматурой – краны 7, 8, 9, 11. Движущую силу процессов фильтрования и промывки – избыточное давление – обеспечивали с помощью сжатого воздуха от компрессора 4 и регулировали газовым редуктором 6. Для контроля за давлением фильтрования на крышке емкости 1 установлен манометр 10.

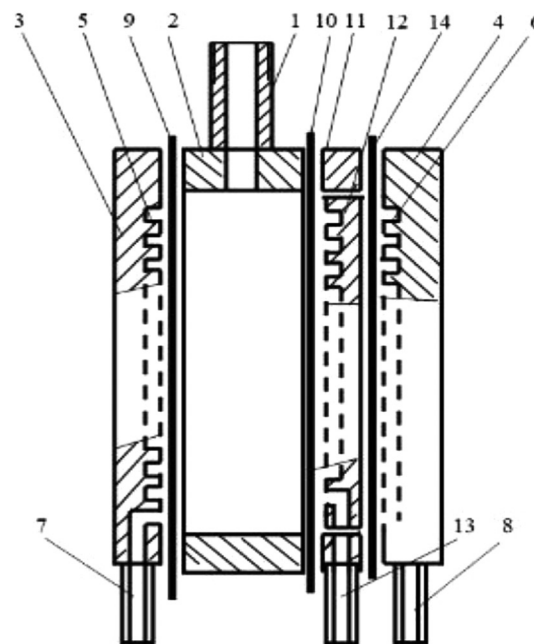


Рис. 3. Фильтрующая ячейка экспериментальной фильтровальной установки

Fig. 3. A filter cell of the experimental filtering unit

Фильтрующая ячейка (рис. 3) содержит резьбовой патрубок 1, приваренный к рамке 2, служащей фильтровальной камерой, а также два фланца 3 и 4. Фланцы имеют дренажные элементы 5 и 6, а также патрубки отвода фильтрата 7 и 8. Между фланцами 3, 4 и рамкой 2 устанавливаются фильтрующие салфетки 9 и 10, и вся ячейка герметизируется с помощью болтов (на рис. 3 не показаны). В составе установки имеются рамки с шириной кольца 10, 20 и 30 мм для моделирования

фильтровальных плит с глубиной камер фильтрования, соответственно, 5, 10 и 15 мм.

В случаях, когда предполагается проводить эксперименты с применением прессования осадка мембраной, между фильтрующей салфеткой 10 и фланцем 4 устанавливается дополнительное кольцо 11, снабженное патрубком отвода фильтрата 13, а также подвижный дренажный элемент 12 и эластичная мембрана 14.

Расчет удельной производительности фильтр-пресса для различных изученных режимов выполнялся по формуле:

$$Q_c = \frac{V_c \cdot 60}{f \cdot T_{\text{ц}}}, \quad (1)$$

где Q_c – удельная производительность фильтр-пресса по суспензии, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; V_c – объем суспензии, отфильтрованный за один цикл, м^3 ; 60 – коэффициент для отнесения длительности отдельных операций к часу; f – поверхность фильтрования экспериментальной установки, м^2 ; $T_{\text{ц}}$ – длительность всего цикла работы фильтр-пресса, мин.

При необходимости расчета удельной производительности по фильтрату или сухому осадку в формулу (1) вместо значения V_c (объем суспензии) подставляли полученные в экспериментах объемы фильтрата или массу осадка.

Результаты расчета производительности фильтр-пресса позволили установить оптимальную толщину рамки, при которой обеспечивается максимальная производительность, и тем самым определили требуемую глубину камеры фильтровальной плиты, которая в данном случае соответствовала половине оптимальной толщины рамки.

Выбранное значение производительности использовали для определения необходимой поверхности фильтрования по формуле:

$$F = \frac{A}{Q}, \quad (2)$$

где F – общая необходимая поверхность фильтрования, м^2 ; A – общее количество суспензии (фильтрата, сухого осадка), которое необходимо обработать в час; Q – удельная производительность фильтр-пресса по суспензии (фильтрату, сухому осадку).

Используя полученные значения общей необходимой поверхности фильтрования, выбирали из типоразмерного ряда поверхность фильтрования одного фильтр-пресса и определили общее количество фильтр-прессов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Параметры и результаты эксперимента по разделению пульпы представлены в табл. 1.

При фильтровании пульпы с использованием ткани S-2180-L2 и S-1197-L2K2 проникновение твердых частиц было одинаковым и в том, и другом случае. И составило 6–7 $\text{г}/\text{дм}^3$ взвешенных веществ. А при использовании ткани S-2193-L2K2 проникновение составило 12–13 $\text{г}/\text{дм}^3$ взвешенных веществ. Все три ткани позволили накопить фильтрующий слой осадка на поверхности. Ткань S-2193-L2K2 менее плотная, имеет большую воздухопроницаемость. При этом она устойчива к высоким рабочим температурам и растворам кислот, что в совокупности повлияло на ее выбор для реализации дальнейших исследований.

Влажность промытого полиметаллического шлама составляла 55–57% масс., а влажность промытого шлама после выщелачивания – 59–61% масс.

В результате лабораторных исследований установлено, что увеличение температуры с 60 до 80°C способствует увеличению скорости фильтрования в 1,2–1,4 раза (серия экспериментов № 1–3).

Определено, что введение в пульпу флокулянта Praestol-650 (Solenis, США) в виде 0,2% раствора, приготовленного на основе маточного раствора, в количестве 20 мл/л исходной пульпы увеличивает скорость фильтрования в 1,6–1,8 раза (эксперименты № 12, 13). Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что введение флокулянта интенсифицирует процесс фильтрования и, кроме того, предотвращает такое нежелательное явление, как проникновение в первые порции фильтрата мельчайших частиц гидроксидов металлов, которые загрязняют его и делают необходимым возврат первой порции фильтрата в технологический цикл. По данным химических анализов концентрация взвешенных веществ в фильтратах при фильтровании с применением флокулянта составляет от 0,01 (и менее) до 0,14 $\text{г}/\text{дм}^3$.

В результате лабораторных исследований процесса фильтрования установлено, что выход фильтрата составляет ~ 0,6 $\text{кг}/\text{дм}^3$ пульпы после выщелачивания полиметаллического шлама. Выход промытого осадка в среднем составляет ~ 0,4 $\text{кг}/\text{дм}^3$ с влажностью 59–61%. При фильтровании пульпы после выщелачи-

Таблица 1. Результаты экспериментов по фильтрованию пульпы после гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама и промывке полученного осадка

Table 1. Experimental results on pulp filtering after hydrometallurgical processing of polymetallic sludge and washing of the resulting sediment

№	Т пульпы, °С	m пульпы, г	Вода для промывки		t, мин		ω осадка, %	Промывная вода	
			pH	T, °С	Фильтрова- ние	Промывка		MgCl ₂ , г/дм ³	HCl, г/дм ³
1	60	250	6,9	60	6	—	59,5	—	—
2	60	250	6,9	60	7	—	59,5	—	—
3	80	250	6,9	60	5	—	59,9	—	—
4	80	250	1,5	60	5	55	59,9	25,7	4,80
5	80	250	1,5	60	5	25	58,5	52,0	5,70
6	80	250	1,5	60	5	18	59,1	60,1	7,30
7	80	250	1,0	60	5	28	59,0	53,1	7,00
8	80	250	1,5	60	5	40	60,1	38,0	6,56
9	80	250	1,0	60	5	5	60,2	53,2	8,75
						10		27,1	4,37
						15		18,1	2,18
						28		8,2	1,46
10	80	250	1,5	60	5	4	59,5	59,8	5,50
						8		30,0	2,75
						14		16,1	2,40
						25		10,5	1,20
11	80	500	1,5	60	13	105	61,0	40,5	7,1
12	80	250	1,5	60	4	65	61,2	48,5	7,20
13	80	500	1,5	60	12	120	61,9	47,2	6,50

вания полиметаллического шлама непромытые осадки содержат в среднем 6–8% MgCl₂, характеризуются как мажущие. Очистка фильтровальной ткани после снятия непромытого осадка затруднена, что может привести к ухудшению ее фильтрационных свойств и сокращению срока службы ткани. Промывка осадков от солей уменьшает их адгезию к различным поверхностям, улучшает транспортные свойства и сьем осадка с фильтровальной ткани.

Промывка осадка на фильтре является более простым способом, позволяющим избежать применения больших емкостей для промывки. Во время промывки осадков на фильтре протекают различные процессы: гидродинамический – вытеснение фильтра из всех проточных пор осадка различного сечения; диффузионный – удаление примесей в результате молекулярной диффузии из тупиковых пор осадка; коллоидный, или физико-химический процесс, который сопровождается десорбцией вещества с поверхности твердых частиц в промывную жидкость [20].

Промывка водопроводной водой остатка от выщелачивания затруднена ввиду обра-

зования новой коллоидной фазы вследствие развития гидролиза хлорида железа (III), захваченного осадком на стадии фильтрования. Гидролиз развивается в результате увеличения pH раствора в составе пульпы из-за добавления воды. Появление коллоидно-дисперсной фазы раствора в составе пульпы выщелоченного полиметаллического шлама является причиной остановки процесса промывки (серия экспериментов № 1–3). Дальнейшие эксперименты по промывке осадка проводили с использованием подкисленной воды.

На основании обобщенных данных, полученных в ходе экспериментов № 9 и 10, построили графики изменения содержания HCl (рис. 4 а) и MgCl₂ (рис. 4 б) в отработанной промывной воде с исходным показателем pH «воды» 1,0 и pH 1,5. В первых трех порциях объемом равным 25 см³ концентрация соляной кислоты снижалась линейно, а затем при прохождении четвертой и пятой порции воды в осадке получил развитие гидролиз FeCl₃, поэтому концентрация соляной кислоты в промывных водах практически не изменялась. В подтверждение этому факту является окраска отработанных промывных вод в светло-корич-

невый цвет, которую придал им коллоидный раствор гидроксида железа (III). В последующих трех порциях промывных вод концентрация HCl продолжала снижаться. Таким образом, использование подкисленной воды для промывки осадка не исключило гидролиз, но способствовало сдерживанию его развития и возможности завершить процесс промывки. Оптимально использование воды для промывки с pH 1,5 по причине меньшего времени, затрачиваемого на промывку осадка, при прочих равных условиях. Анализ содержания MgCl_2 в составе отработанной промывной воды указывает на возможность объединения первой четверти объема промывной воды с фильтратом.

Анализ данных, полученных в ходе эксперимента № 11, свидетельствует о снижении фильтрующих характеристик и эффективности промывки при увеличении толщины слоя осадка.

При реализации экспериментов № 12 и 13 по промывке осадка, обработанного для интенсификации разделения пульпы флокулянтom Praestol-650, установлено, что такой осадок плохо поддается промывке. Остаточное содержание MgCl_2 в осадке, обработанном флокулянтom, составляет 2,1–3,0% против 0,8–1,5% в осадке, не подвергнутом обработке.

С увеличением объема воды, подаваемой на промывку, скорость процесса замедляется. Основную массу растворенного MgCl_2 удается отмыть из осадка при таком соотношении: $\text{T:Ж}=1:2$ – до 90%. При других рас-

ходах степень отмывки осадка составляет: 50–60% при $\text{T:Ж}=1:0,5$; 70–80% при $\text{T:Ж}=1:1$; 80–85% при $\text{T:Ж}=1:1,5$. Оптимальная температура воды для промывки соответствует 60°C. Влажность промытых осадков составляет 59–61% масс. Промытые и отжатые осадки можно характеризовать как ломкие, хорошо снимающиеся с фильтровальной ткани. Промывка и отжим осадков уменьшают их адгезию к различным поверхностям, улучшая их транспортабельные свойства и съем с фильтровальной ткани.

Таким образом, по результатам первой серии экспериментов была сформулирована задача обеспечить полный цикл разделения пульпы, состоящей из полидисперсного тонкого осадка, обладающего высокой величиной гидравлического сопротивления, и агрессивного раствора хлоридов металлов. По результатам исследования состава и структуры пульпы принято решение разделять потоки по средствам камерного и камерно-мембранного фильтр-пресса при постоянном перепаде давления от 400 до 800 кПа.

Основными достоинствами фильтр-пресса являются сравнительно высокая способность к обезвоживанию пульпы, обеспечение глубокой промывки осадка, возможность исполнения аппарата из коррозионностойких материалов, способных работать в условиях агрессивных сред. Фильтр-прессы, оснащенные эластичными мембранами, дополнительно позволяют избежать растрескивания высокодисперсного осадка в ходе промывки и достичь

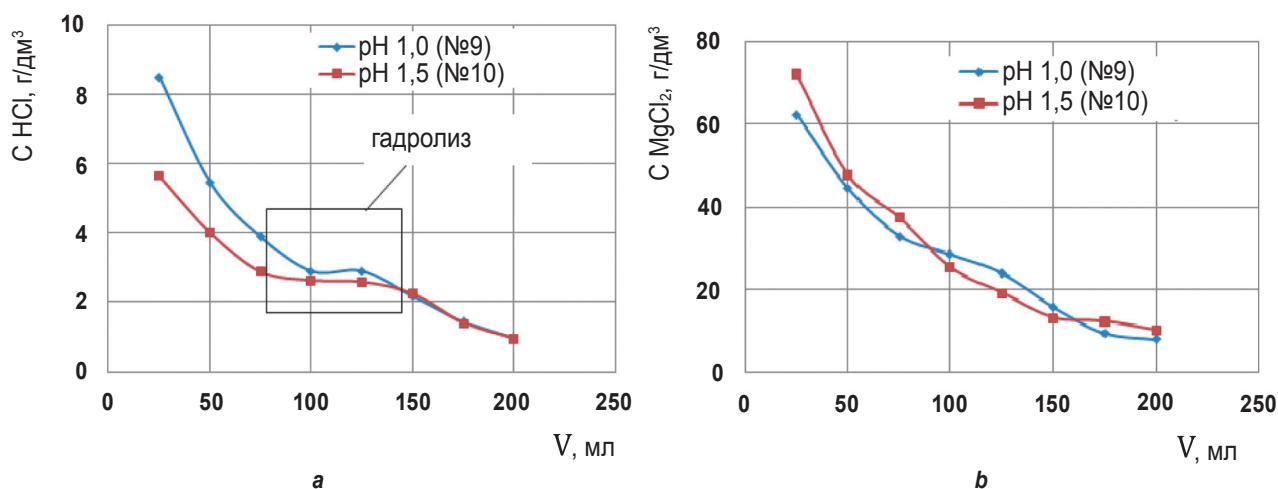


Рис. 4. Графики изменения содержания HCl (а) и MgCl_2 (б) в отработанной промывной воде с исходным показателем pH воды 1,0 и 1,5
 Fig. 4. Graphs of HCl (a) and MgCl_2 (b) content variation in waste wash water with the initial pH water of 1.0 and 1.5

улучшенных характеристик по остаточной влажности. Процесс съема осадка в промышленном масштабе реализуется посредством автоматизированного встряхивания камер, вследствие чего промытый и отжатый осадок самостоятельно перемещается в приемную емкость, таким образом достигается полная автоматизация фильтровального передела.

Результаты экспериментов по разделению пульпы после выщелачивания полиметаллического шлама с использованием ячейки, моделирующей работу камерно-мембранного фильтр-пресса с вертикальным расположением рам, представлены на рис. 5 и 6.

Установлено, что суспензия относится к трудно фильтруемым: в эксперименте № 1а при использовании ячейки глубиной 30 мм через 160 мин, когда скорость выделения фильтрата существенно снизилась, фильтрование прекратили, отжали осадок давлением 600 кПа и просушили его. После вскрытия ячейки установили, что верхняя ее часть заполнена мягким неуплотненным осадком и неотфильтрованной суспензией. Представляется, что для данной суспензии получение нормального осадка толщиной 30 мм проблематично и неэкономично. Дальнейшие эксперименты на модели камерно-мембранного фильтр-пресса выполнялись с использованием фильтровальной ячейки глубиной 20 мм (эксперименты № 2а, 3а, 5а) и 10 мм (эксперименты № 4а, 6а).

Первые эксперименты по фильтрованию суспензии (эксперименты № 1а, 2а) показали, что через 40–50 мин от начала процесса скорость выделения фильтрата существенно снижается. В эксперименте № 2а по истечении 45 мин фильтрования процесс был остановлен и осадок отжат мембраной давлением 800 кПа. Осмотр осадка показал, что большая его часть была довольно плотной, однако сверху (в районе подачи суспензии) осадок оказался влажным и неуплотненным. В эксперименте № 3а длительность фильтрования была увеличена до 52 мин. Осадок был промыт, отжат давлением 600 кПа и выгружен в виде равномерно уплотненного коржа толщиной 18–19 мм. Влажность осадка в обоих случаях (отжим давлением 600 и 800 кПа) была практически одинакова и составляла 56,9% и 55,5% соответственно.

Эксперименты № 3а и 5а выполнены на ячейке с глубиной 20 мм с промывкой осадка.

Во избежание растрескивания осадка во время промывки он был поджат мембраной давлением 300 и 400 кПа. По окончании промывки осадок отжали мембраной давлением 600 кПа (эксперимент № 3а) и 800 кПа (эксперимент № 5а) с последующей просушкой сжатым воздухом давлением 500 кПа. Влажность осадков составила 55,5 и 54,5% соответственно. Скорость фильтрования в момент окончания заполнения ячейки не превышала 31 л/м²·ч.

В эксперименте № 3а промывка осадка осуществлялась двумя объемами воды по отношению к массе влажного осадка, а в эксперименте № 5а промывка осадка выполнялась одним объемом воды. Остаточное содержание $MgCl_2$ в сухом осадке составило 0,51% масс. (эксперимент № 3а) и 1,05% масс. (эксперимент № 5а), при этом общая производительность (с учетом промывки) составила 0,0045 и 0,0076 м³/м²·ч соответственно.

Графики, представленные на рис. 6, иллюстрируют замедление скорости промывки при пропуске второго объема воды по отношению к массе влажного осадка с одновременным снижением ее эффективности с точки зрения содержания вымываемого компонента в промывных водах. С учетом значений остаточной концентрации $MgCl_2$ в сухом осадке и общей производительности процесса установлено, что промывку в условиях применения камерно-мембранного фильтр-пресса целесообразно осуществлять одним объемом воды по отношению к массе влажного осадка.

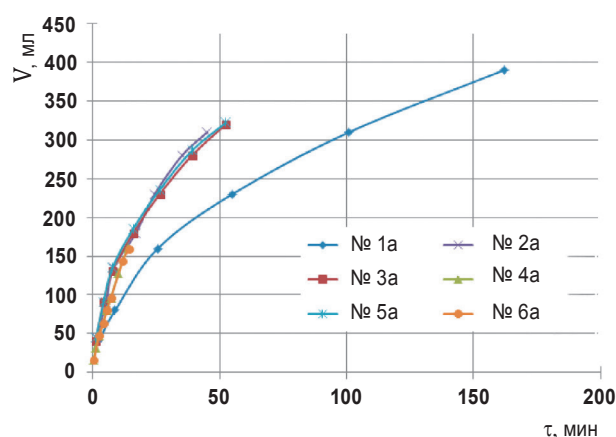


Рис. 5. Протекание процесса фильтрования во времени

Fig. 5. Filtering progression over time

Эксперименты № 4а и 6а были выполнены на ячейке с глубиной 10 мм с промывкой

осадка. Во избежание растрескивания осадка во время промывки он был поджат мембраной давлением 300 кПа. По окончании промывки осадок был отжат мембраной давлением 800 кПа с последующей просушкой сжатым воздухом давлением 400 кПа (эксперимент № 4а) и 800 кПа (эксперимент № 6а). Влажность осадков составила 54,5 и 54,2%. Скорость фильтрования в момент окончания заполнения ячейки достигла 56 л/м²·ч и почти в два раза превысила аналогичный показатель при использовании ячейки глубиной 20 мм.

В эксперименте № 4а промывка осадка осуществлялась двумя объемами воды по отношению к массе влажного осадка, а в эксперименте № 6а промывка осадка выполнялась одним объемом воды. Остаточное содержание MgCl₂ в сухом осадке составило 0,48% масс. (эксперимент № 4а) и 0,82% масс. (эксперимент № 6а), при этом общая производительность (с учетом промывки) составила 0,0059 и 0,0099 м³/м²·ч, что на 30% больше, чем в экспериментах с ячейкой глубиной 20 мм.

Закономерность в отношении оптимального количества промывной воды равного одному объему от массы влажного осадка, установленная при анализе данных экспериментов № 3а и 5а, подтвердилась в экспериментах № 4а и 6а (рис. 6).

Установлено, что электропроводность промывных вод, определенная с помощью кондуктометра, прямо пропорционально зависит от концентрации MgCl₂, что может быть использовано при проектировании системы автоматического контроля процесса промывки осадка.

Анализ экспериментальных данных свидетельствует о том, что первую порцию промывных вод (1/5 часть от объема промывной воды) следует объединять с фильтратом. Данное наблюдение согласуется с выводами, полученными при разделении суспензии с использованием вакуум-фильтра в первой серии экспериментов.

В ходе проведенных исследований установлено, что расход воздуха при просушке составляет 180–200 л/м²·мин (относится к поверхности, на которую подается воздух, т.е. к половине поверхности фильтрования).

Использование мембран во время операций «промывка» и «просушка» уплотняет осадок, не давая ему растрескаться, что создает

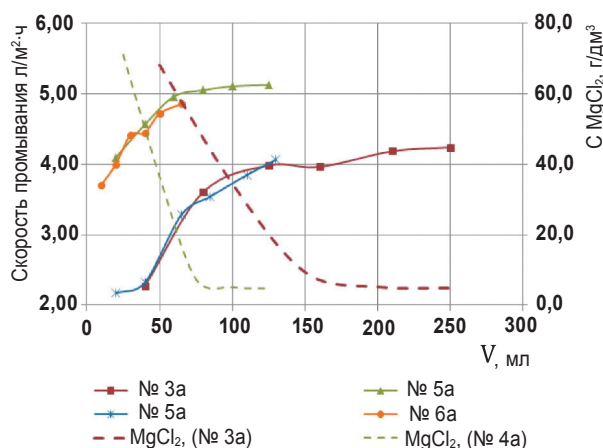


Рис. 6. Зависимость скорости промывки и содержания MgCl₂ в равных порциях промывной воды от объема отработанной промывной воды

Fig. 6. Dependence of the washing rate and MgCl₂ content in equal portions of wash water on the waste wash water volume

более стабильные условия при выполнении этих операций, а также снижает расход воды и воздуха. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что для подпрессовки осадка во время указанных операций достаточно давления 800 кПа.

Первые порции фильтрата (~2–3% всего объема) грязные, последующие – прозрачные. При необходимости можно предусмотреть отдельный отвод первых порций фильтрата.

Целесообразно применение мембранных плит с суммарной глубиной фильтровальных камер 10 мм (толщина осадка – 10 мм). Максимальное давление, подаваемое на мембраны – 800 кПа.

Ориентировочная циклограмма работы фильтр-пресса представлена в табл. 2.

Таблица 2. Ориентировочная циклограмма работы фильтр-пресса

Table 2. Approximate cyclogram of filter press operation

Наименование операции	т, мин	Р, кПа
Фильтрование	15	500
Промывка	70	400
Прессование	3	800
Просушка	2	600
Вспомогательные операции	15	–
ИТОГО цикл	105	–

Расчетная удельная производительность по фильтрату составляет 0,0069 м³/м²·ч.

При мощности в 100000 т/год очищенного раствора хлорида магния из серпентинита образуется 8000 т/год влажного полиметалли-

ческого шлама, при выщелачивании которого получается 16010 т/год или 1,9 т/ч фильтрата. Для получения 1,9 т/ч фильтрата потребуется 255 м² поверхности фильтрования, что с запасом может быть обеспечено одной стандартной машиной с поверхностью фильтрования 500 м² (Shanghai Junyi Filtration Equipment Co., Ltd, Китай).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разделение пульпы гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама с использованием модели камерно мембранного фильтр-пресса с вертикальным расположением плит позволяет минимизировать объем промывных вод, вернуть захваченный осадком маточный раствор в технологию и получить качественный промытый осадок с минимальным содержанием остаточных солей, пригодный для производства железоксидного пигмента.

2. Установлено, что фильтрование пульпы после гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама следует осуществлять с использованием фильтровальных салфеток, изготовленных из 100%-го полипропилена, с удельным весом ткани 540 г/м² ± 10%, воздухопроницаемостью при 200 Па 6 л/дм² в мин ± 30% и максимальной рабочей температурой не менее 90°C. Фильтровальные плиты следует изготовить из полипропилена.

3. Оптимальная температура пульпы, поступающей на фильтрование, соответствует 80°C, температура воды для промывки – 60°C. Лимитирующей стадией процесса разделения пульпы является промывка осадка. Промывка осадка осуществима методом вытеснения при условии использования подкисленной воды с pH 1,5, при соотношении Т:Ж=1:1.

4. Разработана методика оценки влажности осадков, пригодная как для гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама, так и для железосодержащего концентрата, которая позволяет объединить противоречивые данные по влажности полиметаллического шлама, приведенные в разных специализированных источниках.

5. Определены критерии для проектирования системы автоматического контроля и управления процессами разделения суспензии, а также промывки осадка с применением фильтр-пресса, оснащенного эластичными мембранами.

6. Выполнен расчет удельной производительности фильтр-пресса. Установлено, что стандартная машина с поверхностью фильтрования 500 м², с вертикальным расположением плит, обладающих глубиной фильтровальной камеры 5 мм (суммарно две плиты 10 мм), с запасом обеспечит разделение пульпы, полученной при глубокой переработке 8000 т/год влажного полиметаллического шлама.

Список источников

1. Devisilov V., Sharay E., Myagkov I. Filtering of high solids concentration media using complex powerful to the flow // Safety in Technosphere. 2020. Vol. 9. Iss. 2. P. 49–53. <https://doi.org/10.12737/1998-071X-2021-9-2-49-53>. EDN: CDTGBA.
2. Соковнин О.М., Загоскина Н.В., Загоскин С.Н. Исследование процесса объемного фильтрования суспензии золых частиц // Теоретические основы химической технологии. 2015. Т. 49. № 5. С. 595. <https://doi.org/10.7868/s0040357115040156>. EDN: UGESXD.
3. Балмаев Б.Г., Киров С.С., Иванов М.А., Пак В.И. Моделирование процесса фильтрования алюминийсодержащей солянокислой пульпы // Цветные металлы. 2017. № 10. С. 63–68. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.10.07>. EDN: ZXAMSL.
4. Толкачев В.А., Майников Д.В., Пасхин Н.П., Мешков Е.Ю. Исследование процессов сгущения и фильтрования пульпы «желтого кека» (полиураната аммония), образующегося на предприятиях подземного выщелачивания урана // Цветные металлы. 2023. № 1. С. 16–20. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.01.02>.
5. Дзюбо В.В. Влияние характеристик фильтрующих материалов на технологические параметры процесса фильтрования при водоподготовке // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2019. Т. 134. № 2. С. 44–50. EDN: YVCRJJ.
6. Дзюбо В.В. Технологические параметры фильтрования природных вод в режиме нестационарных скоростей // Экология и промышленность России. 2007. № 11. С. 16–18. EDN: JWMHFT.
7. Таран Ю.А., Козлов А.В. Математическое описание процесса фильтрования с закупориванием пор фильтровальной перегородки // Математические методы в технике и технологиях. 2020. Т. 2. С. 99–102. EDN: WDIREE.
8. Ульрих Е.В., Баркова А.С. Параметры флокуляции сточных вод с последующим фильтрованием на пресс-фильтрах // Известия КГТУ. 2022. № 66. С. 53–64. <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2022-66-53-64>. EDN: IPERXG.

9. Ajao V., Bruning H., Rijnaarts H., Temmink H. Natural flocculants from fresh and saline wastewater: comparative properties and flocculation performances // *Chemical Engineering Journal*. 2018. Vol. 349. P. 622–632. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.123>.
10. Гонтарж Э.А. Эффективное решение задачи фильтрования в процессе разделения промышленных суспензий // *Металлург*. 2010. № 11. С. 27–28. EDN: NCHNNH.
11. Орешкина М.В. К вопросу фильтрования суспензии в динамическом фильтре-прессе // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2019. № 1. С. 129–133. EDN: ZTOVLV.
12. Loan M., Newman O.M.G., Cooper R.M.G., Farrow J.B., Parkinson G.M. Defining the paragoethite process for iron removal in zinc hydrometallurgy // *Hydrometallurgy*. 2006. Vol. 81. Iss. 2. P. 104–129. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.11.002>.
13. Неизвестных Н.Н., Богданов А.В., Мячин А.В., Федотов К.В. Исследование процессов сгущения пульп руд золото-серебрянных месторождений «Биркачан» и «Цоколь» // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2013. № 6. С. 147–151. EDN: QCRBZD.
14. Владимиров А.С., Катышев С.Ф., Теслюк Л.М. Совершенствование процесса промывки аморфного диоксида кремния, полученного при солянокислотном выщелачивании серпентинита // *Химическая технология*. 2015. Т. 16. № 3. С. 139–141. EDN: TKVKJP.
15. Hedin R. Recovery of marketable iron oxide from mine drainage in the USA // *Journal of Land Contamination and Reclamation*. 2003. Vol. 11. Iss. 3. P. 93–97. <https://doi.org/10.2462/09670513.802>.
16. Майников Д.В., Толкачев В.А., Смирнов К.М. Применение колонных аппаратов с пульсационным перемешиванием для классификации, выделения и промывки песков в гидрометаллургии // *Химическая технология*. 2018. Т. 19. № 2. С. 88–92. EDN: YOKBEE.
17. Мохирева Н.Л., Миролюбов В.Р., Низов В.А. Комплексное использование отхода производства оксида магния с получением модифицированного железооксидного пигмента и никелевого концентрата // *Химическая технология*. 2020. Т. 21. № 4. С. 156–162. <https://doi.org/10.31044/1684-5811-2020-21-4-156-162>. EDN: GXCQJT.
18. Мохирева Н.Л., Миролюбов В.Р., Низов В.А. Перспективы применения пигментов, полученных из железосодержащих шламов, в составе строительных и лакокрасочных композиций // *Экология и промышленность России*. 2020. Т. 24. № 5. С. 14–20. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-5-14-20>. EDN: WMOIKQ.
19. Фрейдлина Р.Г., Пастухова Т.Я., Сабуров Л.Н., Овчинникова Н.Б., Дудина М.В. Очистка хлормagneйевых растворов от примесей нейтрализацией и фильтрованием // *Цветная металлургия*. 2006. № 9. С. 23–25.
20. Жужиков В.А. Фильтрование: теория и практика разделения суспензий. М.: Химия, 1971. 440 с.

References

1. Devisilov V., Sharay E., Myagkov I. Filtering of high solids concentration media using complex powerful to the flow. *Safety in Technosphere*. 2020;9(2):49-53. <https://doi.org/10.12737/1998-071X-2021-9-2-49-53>. EDN: CDTGBA.
2. Sokovnin O.M., Zagorskina N.V., Zagoskin S.N. A study of the deep-bed filtration of a suspension of ash particles. *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii = Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2015;49(5):595. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0040357115040156>. EDN: UGESXD.
3. Balmaev B.G., Kirov S.S., Ivanov M.A., Pak V.I. Filtration process modeling for aluminium-bearing hydrochloric acid pulp. *Tsvetnye Metally*. 2017;10:63-68. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.10.07>. EDN: ZXAMSL.
4. Tolkahev V.A., Maynikov D.V., Pashin N.P., Meshkov E.Yu. Understanding the processes of thickening and filtration of yellow cake slurry (ammonium polyuranate) generated by in-situ uranium leaching sites. *Tsvetnye Metally*. 2023;1:16-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.01.02>.
5. Dzjubo V.V. Influence of characteristics of the filtering materials on technological parameters of process of filtering at water treatment. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2019;2:44-50. (In Russ.). EDN: YVCRJJ.
6. Dzjubo V.V. Technological parameters of natural water filtering in a non-stationary speed mode. *Ekologiya i promyshlennost Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2007;11:16-18. (In Russ.). EDN: JWMHFT.
7. Taran Y.A., Kozlov A.V. Mathematical description of the filtration process with clogging of the filter partition pores. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah*. 2020;2:99-102. (In Russ.). EDN: WDIREE.
8. Ul'rikh E.V., Barkova A.S. Parameters of wastewater flocculation with subsequent filtration on press filters. *Izvestiya KGTU*. 2022;66:53-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2022-66-53-64>. EDN: IPERXG.
9. Ajao V., Bruning H., Rijnaarts H., Temmink H. Natural flocculants from fresh and saline wastewater: comparative properties and flocculation performances. *Chemical Engineering Journal*. 2018;349:622-632. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.123>.
10. Gontarzh E.A. An effective solution of filtration problem when separating industrial suspensions. *Metallurg*. 2010;11:27-28. (In Russ.). EDN: NCHNNH.
11. Oreshkina M.V. To the question of filtering suspensions in a dynamic filter press. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*. 2019;1:129-133. (In Russ.). EDN: ZTOVLV.
12. Loan M., Newman O.M.G., Cooper R.M.G., Farrow J.B., Parkinson G.M. Defining the paragoethite process for iron removal in zinc hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*. 2006;81(2):104-129. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.11.002>.
13. Neizvestnykh N.N., Bogdanov A.V., Myachin A.V., Fedotov K.V. Studying ore pulp thickening of “Birkachan” and “Tsokol” gold-silver deposits. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;6:147-151. (In Russ.). EDN: QCRBZD.

14. Vladimirov A.S., Katyshev S.F., Teslyuk L.M. Improving washing of amorphous silicon dioxide obtained by serpentinite leaching with hydrochloric acid. *Himicheskaya tekhnologiya = Journal of Chemical Technology*. 2015; 3 (16):139–141. (In Russ.). EDN: TKVKJP.
15. Hedin R. Recovery of marketable iron oxide from mine drainage in the USA. *Journal of Land Contamination and Reclamation*. 2003;11(3):93-97. <https://doi.org/10.2462/09670513.802>.
16. Maynikov D.V., Tolkachyov V.A., Smirnov K.M. Application column apparatus with pulsating stirring for classification, separation and washing sands in hydrometallurgy. *Himicheskaya tekhnologiya = Journal of Chemical Technology*. 2018;2:88-92. (In Russ.). EDN: YOKBEE.
17. Mokhireva N.L., Mirolubov V.R., Nizov V.A. Complex use of magnesium oxide manufacture waste with production of modified iron oxide pigment and nickel concentrate. *Himicheskaya tekhnologiya = Journal of Chemical Technology*. 2020;4:156-162. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-5811-2020-21-4-156-162>. EDN: GXCQJT.
18. Mokhireva N.L., Mirolubov V.R., Nizov V.A. Prospects for the use of pigments obtained from iron-containing sludge in the composition of construction and paint compositions. *Ekologiya i promyshlennost Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2020;24 (5):14-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-5-14-20>. EDN: WMOIKQ.
19. Freidlina R.G., Pastukhova T.Y., Saburov L.N., Ovchinnikova N.B., Dudina M.V. Purification of magnesium chloride solutions from impurities by neutralization and filtration. *Tsvetnaya Metallurgiya = Nonferrous metallurgy*. 2006;9:23-25. (In Russ.).
20. Zhuzhikov V.A. *Filtering: theory and practice of suspension separation*. Moscow: Khimiya; 1971, 440 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мохирева Наталья Леонидовна,
заместитель директора по развитию
по научно-исследовательской работе и технологии,
ООО «Бергауф Строительные Технологии»,
620014, г. Екатеринбург, ул. Шейнкмана, 75, Россия
✉ khohlun@mail.ru

Natalya L. Mokhireva,
Deputy Director for Development, Research
and Technology,
LLC "Bergauf Construction Technologies",
75 Sheikman St., Ekaterinburg 620014, Russia
✉ khohlun@mail.ru

Логинова Ирина Викторовна,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
i.v.loginova@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1627-4634>

Irina V. Loginova,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
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
i.v.loginova@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1627-4634>

Миролюбов Виталий Романович,
к.х.н., доцент,
доцент кафедры технологии
электрохимических производств,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
v.r.mirolyubov@urfu.ru

Vitaly R. Mirolubov,
Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Electrochemical
Production Technology,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
v.r.mirolyubov@urfu.ru

Шопперт Андрей Андреевич,
д.т.н., доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
a.a.shoppert@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9684-9628>

Andrey A. Shoppert,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate 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
a.a.shoppert@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9684-9628>

Вклад авторов

Contribution of the authors

Авторы выполнили аналитическую работу, на основании полученных результатов провели обобщение, подготовили рукопись к печати.

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

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 15.01.2024 г.; одобрена после рецензирования 20.02.2024 г.; принята к публикации 25.02.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 15.01.2024; approved after reviewing 20.02.2024; accepted for publication 25.02.2024.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 669.71

EDN: XHFGYC

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-162-177



Изучение особенностей магнитогидродинамики электролизёров С-8БМ (С-8Б) при модернизации алюминиевых заводов

А.А. Пинаев¹, Е.Ю. Радионов², И.А. Орлов³, Н.В. Немчинова⁴✉¹⁻³ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр», г. Красноярск, Россия^{3,4}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – расчет показателей магнитной гидродинамики алюминиевого электролизера для сравнения разных видов ошинок, используемых на ваннах с анодом Содерберга. Для проведения расчетов электрических параметров электролизера (токораспределения по блямсам и анодным штырям) и характеристик магнитного поля использовалась компьютерная программа «Blums V5.07» (ООО «Полифем», Россия). С помощью программы «MHD-Valdis» (разработчик В. Бояревич, университет Гринвич, Великобритания) были получены данные по скоростям циркуляции и перекосу металла в электролизере. В ходе выполнения исследований были построены математические модели электролизера типа С-8БМ (С-8Б) с различными конструкциями ошинок. Выбраны 3 варианта ошинок, на которых испытывалась установка переключки, предназначенной для замыкания токораспределения анодной ошинок электролизера. Данные типы ошинок выполнялись в 2 вариациях: с переключкой и без нее. По полученным данным рассчитанных скоростей циркуляции и перекоса металла была выполнена оценка возможности модернизации ванн с анодом Содерберга без значительных капитальных затрат. При использовании 1-го типа ошинок достигнуты наилучшие значения распределения тока по блямсам с диапазонами, составляющими ~757 А (для варианта без переключки) и ~656 А (для модернизированного варианта с замкнутыми рядами), и по анодным штырям с диапазонами ~1754 А и ~1609 А, соответственно. Показано, что при использовании 3-го варианта ошинок токораспределение после установки переключки между анодными шинами незначительно ухудшается. По полученным результатам можно сделать вывод, что при модернизации электролизера С-8БМ (С-8Б) с различными видами ошинок токораспределение по блямсам и анодным штырям, характеристики магнитного поля (компоненты B_y и B_z), а также скорости циркуляции и перекося металла не оказывают значительного влияния на эффективность работы данного электролизера, что способствует более быстрому переходу на ведение электролиза на ваннах ЭкоСодерберг и без значительных экономических затрат.

Ключевые слова: производство первичного алюминия, электролизер С-8БМ (С-8Б), ЭкоСодерберг, ошиновка, магнитное поле, токораспределение, перекося металла, скорость циркуляции, модернизация, математическое моделирование

Для цитирования: Пинаев А.А., Радионов Е.Ю., Орлов И.А., Немчинова Н.В. Изучение особенностей магнитогидродинамики электролизёров С-8БМ (С-8Б) при модернизации алюминиевых заводов // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 162–177. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-162-177>. EDN: XHFGYC.

METALLURGY

Original article

Analysis of the magnetohydrodynamic parameters of S-8BM (S-8B) electrolyzers in the modernization of aluminum smelters

Andrey A. Pinaev¹, Evgeniy Yu. Radionov², Ivan A. Orlov³, Nina V. Nemchinova⁴✉¹⁻³RUSAL Engineering and Technology Center LLC, Irkutsk, Russia^{3,4}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The article aims to determine the magnetohydrodynamic parameters of an aluminum electrolyzer in order to compare different types of bus arrangements used in baths with a Soderberg anode. The electrical parameters of the electrolyzer (current distribution across blooms and anode studs) and magnetic field parameters were computed using the Blums V5.07 program (Polyfem, Russia). Data on circulation rates and skew of the metal in the electrolyzer were obtained using the MHD-Valdis program (developed by V. Boyarevich, University of Greenwich, UK). In the course of the studies, mathematical models of the C-8BM (C-8B) electrolyzer with various bus arrangements were built. Three bus arrangements were selected for testing the installation of a bridge designed to close the current distribution in the anode bus arrangement

of the electrolyzer. These types of bus arrangements were realized in two variants: with and without a bridge. The obtained circulation rates and skew of the metal were used to evaluate the possibility of modernizing baths with a Soderberg anode without significant capital costs. When using the first type of bus arrangement, the best current distribution was achieved for the blooms with limits of ~757 A (for the variant without a bridge) and ~656 A (for the modernized variant with closed series), as well as for the anode studs having limits of ~1754 A and ~1609 A, respectively. With the use of the third bus arrangement variant, the current distribution was shown to slightly decrease following the installation of a bridge between the anode bus bars. The obtained results suggest that in the modernization of a C-8BM (C-8B) electrolyzer with different types of bus arrangements, current distribution across blooms and anode studs, magnetic field characteristics (B_y and B_z components), as well as circulation rates and skew of the metal, have no significant impact on the efficiency of this electrolyzer, which contributes to a faster transition to EcoSoderberg bath electrolysis without significant economic costs.

Keywords: primary aluminum production, S-8BM (S-8B) electrolyzer, EcoSoderberg, busbars, magnetic field, current distribution, metal distortion, circulation rate, modernization, mathematical modeling

For citation: Pinaev A.A., Radionov E.Yu., Orlov I.A., Nemchinova N.V. Analysis of the magnetohydrodynamic parameters of S-8BM (S-8B) electrolyzers in the modernization of aluminum smelters. *iPolytech Journal*. 2024;28(1): 152-167. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-162-177>. EDN: XHFGYC.

ВВЕДЕНИЕ

Российская алюминиевая промышленность является передовой отраслью металлургии, внося существенный вклад в экономику нашей страны. Производители и ученые проводят исследования и внедряют разработки, направленные на вовлечение в производство новых и альтернативных видов глиноземного сырья [1–4], совершенствование технологических процессов получения первичного алюминия [5–7], решение экологических проблем [8–12].

Развитие отечественной алюминиевой промышленности направлено как на модернизацию существующих производств, эксплуатирующих ванны с анодом Содерберга, так и на строительство новых заводов. В настоящее время на действующих алюминиевых заводах осуществляется перевод электролизеров с анодом Содерберга на ванны с предварительно обожженными анодами (ОА).

Однако данный перевод требует большого количества затрат на изменение конструкций анодного и катодного узлов, ошиновки, системы газоудаления (СГУ). Поэтому до сих пор остается актуальной темой модернизация электролизеров с анодом Содерберга, которыми оснащены известные старейшие предприятия компании «РУСАЛ» (Красноярский, Братский, Иркутский, Новокузнецкий алюминиевые заводы). Согласно [13], технология электролиза с применением ванн с анодом Содерберга более привлекательна с точки зрения себестоимости производимого алюминия.

Однако данный тип ванн не отвечает экологическим требованиям, предъявляемым в настоящее время. Поэтому на российских алюминиевых заводах запущен проект, подразумевающий глубокую модернизацию

электролизеров с анодом Содерберга, которая включает в себя целый ряд мероприятий:

Совершенствование газосборного колокола, основанное на повышении пропускной способности и улучшении аэродинамических характеристик подколокольного пространства. Для этого была увеличена площадь поперечного сечения газоходного канала и изменены секции газосборного колокола (ГСК) с трапецеидальной на параболическую (рис. 1) [14]. За счет данного изменения удалось приблизиться к круглой форме ГСК, что привело к отсутствию застойных зон и снижению вероятности образования отложений.

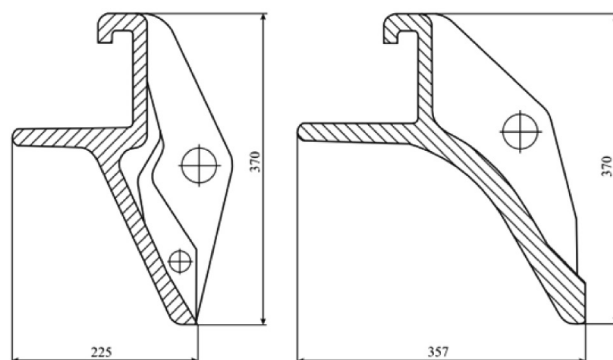


Рис. 1. Сечение секции газосборного колокола [14]:
а – трапецеидальная форма; б – параболическая форма

Fig. 1. Section of the gas collecting bell section [14]:
a – trapezoidal shape; b – parabolic shape

Совершенствование системы газоудаления (рис. 2), которое заключается в замене горелочных устройств щелевого типа [15] на четырехкупольные системы газоудаления. СГУ [11, 16] состоит из 4 куполов, 2 из них расположены по углам и 2 по продольным сторонам, между бункерами системы автоматической подачи глинозема (АПГ). Купола

соединены трубопроводом, по которому газы удаляются в систему организованного отсоса. Данные купола обеспечивают равномерный отвод газов из колокола, а наличие в них отверстий для подсоса воздуха – догорание анодных газов.



Рис. 2. Электролизер С-8БМ(Э), оборудованный четырехкупольной СГУ [14]

Fig. 2. S-8BM(E) electrolyzer equipped with a four-dome gas removal system [14]

В совокупности все перечисленные внедренные мероприятия позволяют снизить негативное воздействие на окружающую среду вблизи алюминиевых предприятий, а также повысить экономические показатели за счет меньшего расхода электроэнергии и более высокого выхода по току⁵.

После модернизации на опытной группе (рис. 3) были получены следующие экологические показатели [14]:

- КПД укрытия составил 99,3%;
- среднесуточная эффективность укрытия составила 97,4%;
- выбросы в атмосферу снизились на 15%;
- снижение выбросов фтора составило 34%.

Передовая технология, разработанная специалистами ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр», дала фактически второе рождение традиционному способу производства алюминия на электролизерах с анодом Содерберга. Данный проект получил название «ЭкоСодерберг»⁶. Однако по факту реализации проекта модернизации были выявлены некоторые особенности, связанные с тем, что ошиновка на электролизерах с самообжигающимися анодами разного типа на различных алюминиевых заводах имеет отличительные конструкционные особенности [14, 17–20].

На примере филиала ПАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов (Иркутского алюминиевого завода (ИркАЗа)) авторы при помощи математического моделирования проанализировали работу электролизеров ЭкоСодерберг при использовании на них ошиновок различных конструкций.



Рис. 3. Электролизер С-8БМ(Э), оборудованный автоматической подачей глинозема

и четырехкупольной системой газоудаления⁷

Fig. 3. S-8BM(E) electrolyzer equipped with an automatic alumina supply and a four-dome gas removal system⁷

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Нами были построены математические модели электролизеров С-8БМ (С-8Б) с разными видами ошиновки, для дальнейшего анализа работы ванн в конструкцию вносились изменения.

Для расчетов токораспределения и магнитного поля математические модели ванн выполнялись в программе «Blums v5.07» (ООО «Полифем», Россия), прототипом которой послужила трехмерная модель расчета МГД-параметров алюминиевого электролизера [21]. Данная программа была опробована на многих типах электролизеров, в ее разработке принимали участие специалисты различных научно-исследовательских и отраслевых институтов. Современные электролизеры РА-300, РА-400 и РА-550 были разработаны в разное время и в разных версиях данной программы. Также для моделирования и выбора оптимальных магнитогидродинамических (МГД) параметров использовалась и другая программа, зарекомендовавшая себя во многих странах, – «MHD-Valdis» (разработчик В. Бояревич, университет Гринвич, Великобритания) [22, 23]. Данная программа, основанная

⁵ИТС 11-2022. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство алюминия (утв. Приказом Росстандарта от 16.12.2022 № 3197).

⁶ЭкоСодерберг // РУСАЛ. Режим доступа: <https://rusal.ru/innovation/technology/ekosoderberg/> (дата обращения: 20.09.2023).

⁷«РУСАЛ»: миллиардные вложения не только в производство. Режим доступа: https://prom-siberia.ru/industry/metallurgy/rusal-milliardnye-vlozheniya-ne-tolko-v-proizvodstvo/?tdb_action=tdb_ajax (дата обращения: 20.09.2023).

на теории «мелкой воды», как и в отечественных разработках, предназначена для расчета электрических характеристик и МГД-процессов в алюминиевых электролизерах.

Данные программы были разработаны для изучения методом моделирования электролизеров различных типов, в том числе и электролизеров с анодом Содерберга с верхним токоподводом. Программы зарекомендовали себя с лучшей стороны, поскольку с их помощью были разработаны и рассчитаны различные параметры (МГД-параметры, перекося металла, скорости циркуляции, плотности тока, значения тока, проходящего по шинам, температура ошиновки, распределение тока в бляхах и анодах) таких электролизеров, как ОА-300М1, ОА-300М2, РА-167, РА-300, РА-400, РА-500.

При построении математических моделей, а также их верификаций были приняты следующие исходные данные:

- уровень металла = 30 см;
- уровень электролита = 20 см;
- междуполосное расстояние (МПР) = 4,5 см.

По выбранным данным были выполнены расчеты различных ошинок для электролизера С-8Б (С-8ВМ).

Для каждого из вариантов были проведены расчеты без перемычки и перемычки с закольцованными рядами. Перемычка представляет собой шину, которая замыкает между собой ряды анодных шин и меняет токораспределение и МГД-параметры (рис. 4).

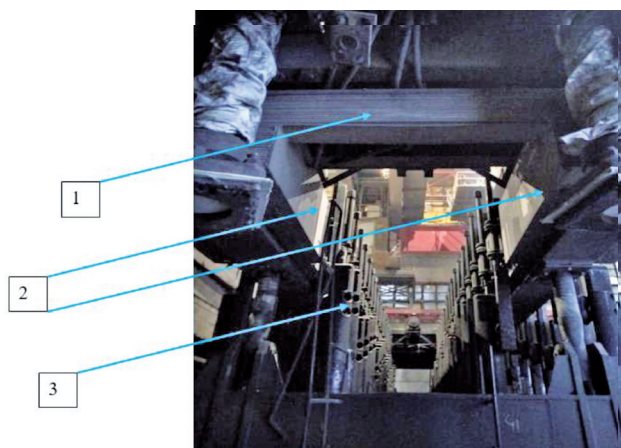


Рис. 4. Анодное устройство электролизера С-8ВМ (С-8Б): 1 – перемычка; 2 – анодные шины; 3 – штыри
Fig. 4. S-8BM (S-8B) electrolyzer anode: 1 – bridge; 2 – anode buses; 3 – pins

В алюминиевых электролизерах, которые работают на электрическом токе, возникают мощные электромагнитные силы. Однако в конструктивных элементах электролизера эти силы не проявляются, они возникают в жидком алюминии, который является проводником тока.

При прохождении тока через проводник, вокруг него возникает магнитное поле, которое создается движущимися электрическими зарядами. Силовой характеристикой магнитного поля служит вектор магнитной индукции $\vec{B}$, Т:

$$\vec{B} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2},$$

где B_x – горизонтальная составляющая магнитной индукции, направленная вдоль тока серии; B_y – горизонтальная составляющая магнитной индукции, направленная поперек тока серии; B_z – вертикальная составляющая магнитной индукции.

Компонента B_x не рассматривалась в данной работе, так как ее влияние минимально для электролизеров с продольным расположением в корпусе [24].

Под воздействием электромагнитных сил форма поверхности металла изменяется, а также изменяется МПР. В результате возникает циркуляция расплава, которая может привести к замыканию подошвы анода с жидким алюминием и перекося поверхности алюминия⁸ [25].

Ток в алюминиевых электролизерах течет в разных направлениях. Он движется вертикально: вверх и вниз по аноду и стоякам. Также ток движется горизонтально – вдоль и поперек ванны по анодным и катодным шинам, а также по бляхам. Из-за того, что ток движется в разных направлениях, магнитная индукция в каждой точке ванны имеет сложную структуру.

МПР является переменной величиной и зависит от различных факторов: состояния подошвы анода, волнения металла, присутствия газа и угольных частиц в электролите. Фактическая плотность тока в электролите также является переменной и невозможно ее управлять напрямую. В расчетах приходится принимать плотность тока, равную анодной

⁸Гефтер С.Э., Евдокимов С.В., Тимченко Б.И. Исследование магнитных полей на алюминиевых электролизерах усовершенствованных конструкций различного типа и мощности. Этапы 1,2,4. Промышленные испытания. Отчет ВАМИ по теме 5-67-067. Л., 1968. 40 с.

плотности тока, чтобы упростить моделирование процессов в электролизере [26].

Также было изучено двухфазное газожидкостное движение, которое возникает в электролизерах при выделении газа из-под анода [27].

Под воздействием больших объемов выходящего газа возникают сильные движения газа в междуполюсном зазоре и пространстве «борт-анод». Эти движения трудно поддаются расчету, так как они зависят от множества факторов: силы тока, физических свойств газа и жидкости, геометрии электролизера и других.

Газовая фаза под анодом может находиться в виде пузырьков или протяженных пленок, или в комбинации этих структур. Толщина пленок мало зависит от плотности тока и составляет около 5 мм для анодов Содерберга и 3–4 мм для ОА. Скорость перемещения пузырьков и пленок на подошве анода зависит от их размеров. Крупные пузыри имеют более высокую скорость перемещения, достигающую 20–25 см/с, в то время как маленькие пузыри движутся со скоростью 6–8 см/с.

Известно, что размер и скорость перемещения газовых пузырьков может влиять на процессы, происходящие в электролизере. Например, большие пузыри могут вызывать неоднородное распределение потока электролита и создавать неэффективные зоны обработки. Понимание этих процессов имеет важное значение для оптимизации работы электролизеров и повышения их эффективности⁷ [28].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 5–8 приведены примеры моделей расчета МГД-параметров электролизера, представленного на рис. 3.

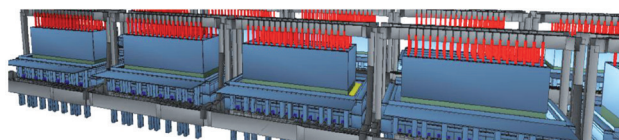


Рис. 5. Общий вид рассчитываемой модели электролизера

Fig. 5. General view of the calculated electrolysis cell model

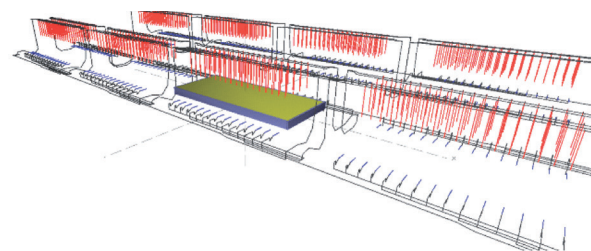


Рис. 6. Модель для расчета МГД-параметров электролизеров – система электрических проводников

Fig. 6. A model for calculating magnetohydrodynamical parameters of electrolysis cells – a system of electrical conductors

В наших исследованиях рассчитывались 3 типа ошиновки (рис. 7): 1-й – классическая 4-стоячная ошиновка «Цыплакова»⁸ [29], в которой глухая сторона находится ниже лицевой (рис. 7 а); 2-й – модернизированная ошиновка, в которой катодная шина располагается на 2-х уровнях для компенсации вертикальной компоненты B_z в местах максимального ее влияния, а именно в районе выходного торца (рис. 7 б); 3-я – модернизированная ошиновка, на глухой стороне которой выполнена перекоммутация по блокам, т.е. перераспределение подключенных блоков по шинам, и на лицевой стороне добавлена шина; данные изменения выполнены с целью перераспределения тока по блокам, снижения перепада напряжения [30–32], а, главное, снижения расхода электроэнергии (рис. 7 с).

На рис. 8 представлены модели различных типов ошиновки электролизера после проведения частичной модернизации (установки перемычки для закольцовывания рядов анодных шин).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

Для рассмотренных вариантов были проведены расчеты токораспределения, магнитного поля, скоростей циркуляции и перекося металла.

На рис. 9–14 представлены результаты математического моделирования скорости циркуляции (ось V_m , м/с), перекося металла (ось DH , м). Общие оси X и Y отображают геометрические размеры электролизера (м).

⁸А.с. № 463348, СССР, С25С 3/16. Ошиновка алюминиевых электролизеров / В.П. Никифоров, В.И. Носиков, И.Г. Киль, И.К. Цыбуков, А.Н. Смородинов, А.М. Цыплаков, Н.П. Будкевич, Н.И. Выходов; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт алюминиевой, магниевой и электродной промышленности. № 1286459. Заявл. 02.12.1968; опубл. 25.11.1977. Бюл. № 43.

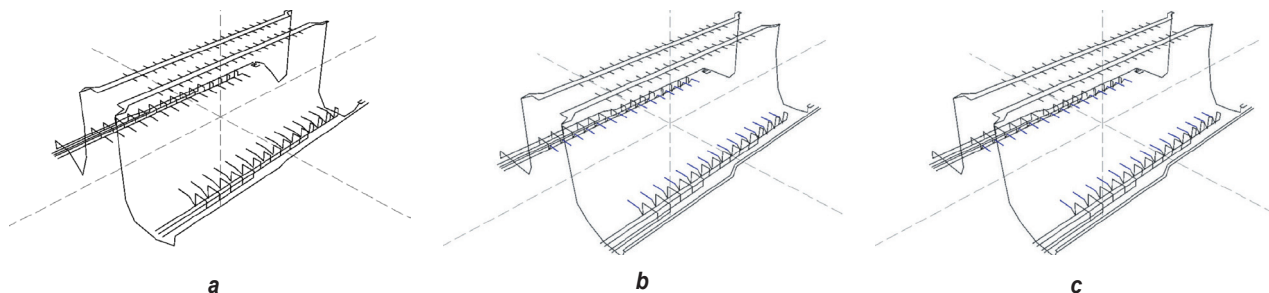


Рис. 7. Типы ошинок в моделях: а – 1-й; б – 2-й; в – 3-й
Fig. 7. Types of busbars in models: a – 1st; b – 2nd; c – 3rd

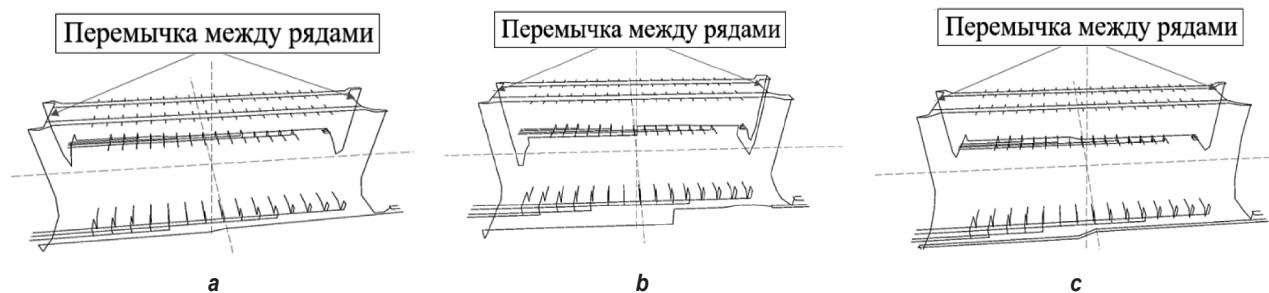


Рис. 8. Типы ошинок в моделях с закольцованными рядами: а – 1-й; б – 2-й; в – 3-й
Fig. 8. Types of busbars in the models with looped rows: a – 1st; b – 2nd; c – 3rd

Как видно из рис. 9, 10, при использовании 1-го типа ошиновки зафиксирована многоконтурная система циркуляции металла с выраженным большим контуром, на данном

варианте – минимальные скорости циркуляции и статический перекося. После установки перемычки наблюдается уменьшение перекося металла.

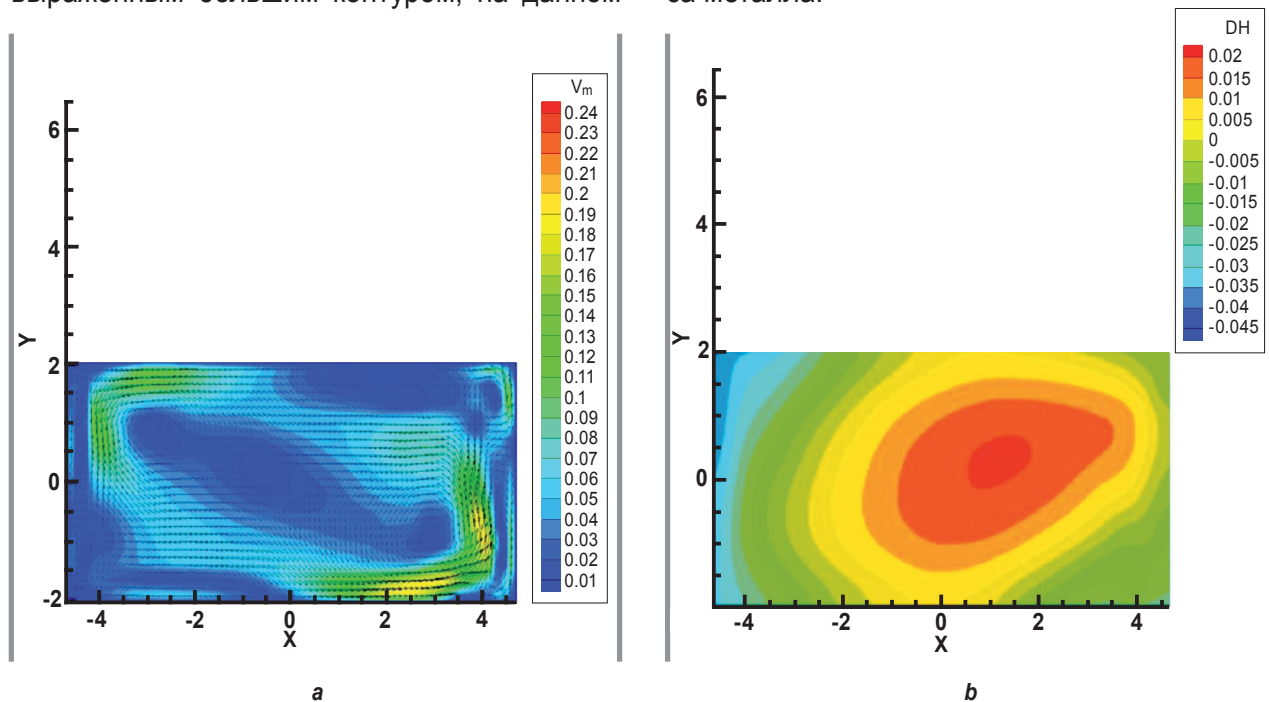


Рис. 9. Результаты моделирования для 1-го типа ошиновки без перемычки:
а – скорости циркуляции металла; б – перекося металла
Fig. 9. Simulation results for the 1st busbar type without a bridge:
a – metal circulation rates; b – metal distortion

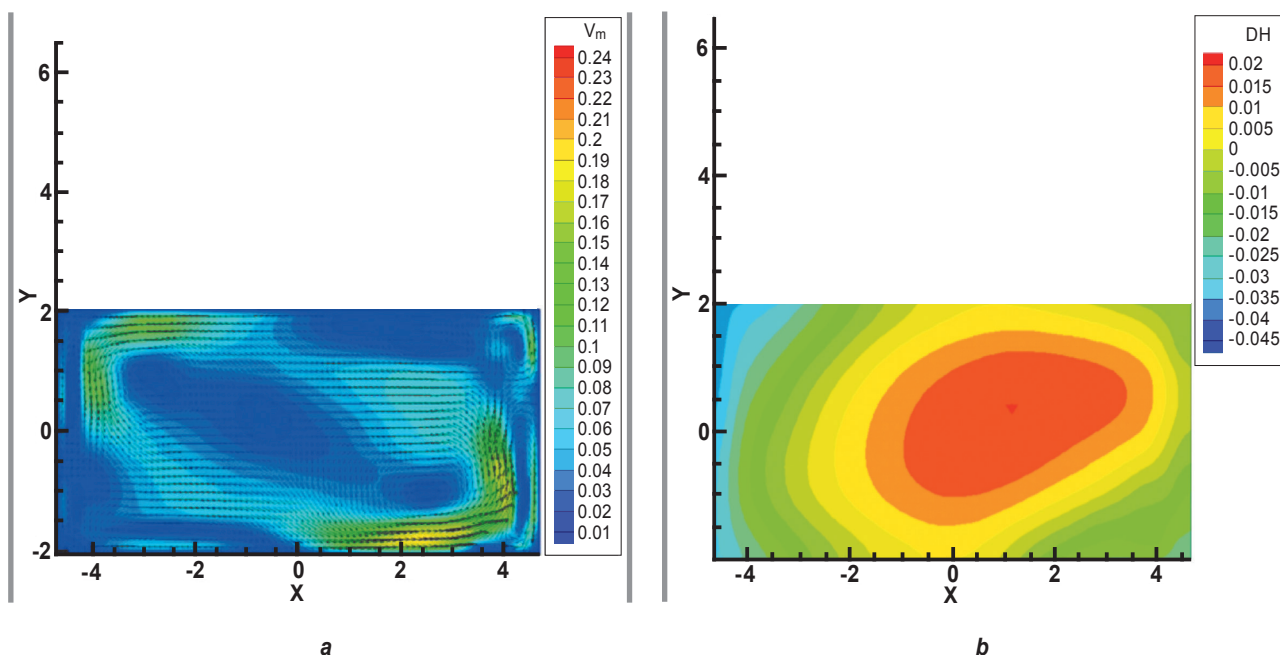


Рис. 10. Результаты для 1-го типа ошиновки с перемычкой:
 а – скорости циркуляции металла; б – перекося металла
 Fig. 10. Results for the 1st busbar type with a bridge:
 а – metal circulation rates; б – metal distortion

При использовании 2-го типа ошиновки (см. рис. 11, 12) также получена выраженная многоконтурная система циркуляции с выраженным большим контуром, на данном варианте стати-

ческий перекося металла смещен ближе к глухой стороне электролизера. После установки перемычки наблюдается уменьшение перекося металла и смещение зеркала к центру.

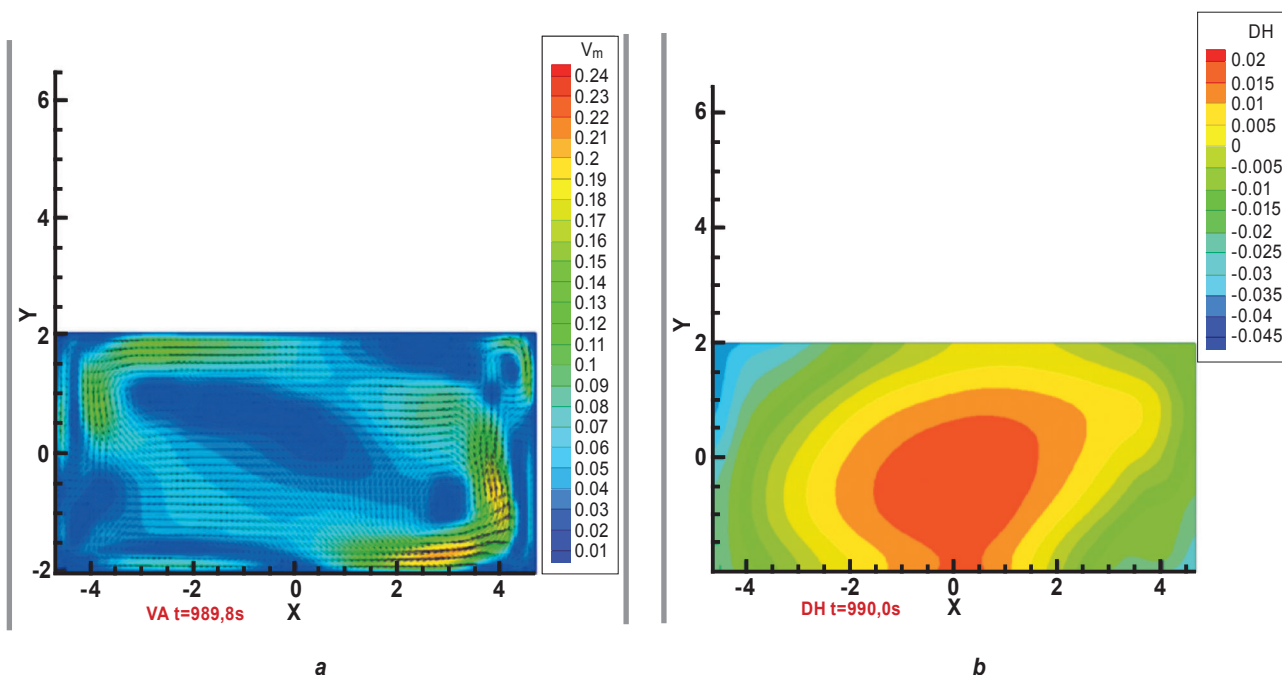


Рис. 11. Результаты для 2-го типа ошиновки без перемычки:
 а – скорости циркуляции металла; б – перекося металла
 Fig. 11. Simulation results for the 2nd busbar type without a bridge:
 а – metal circulation rates; б – metal distortion

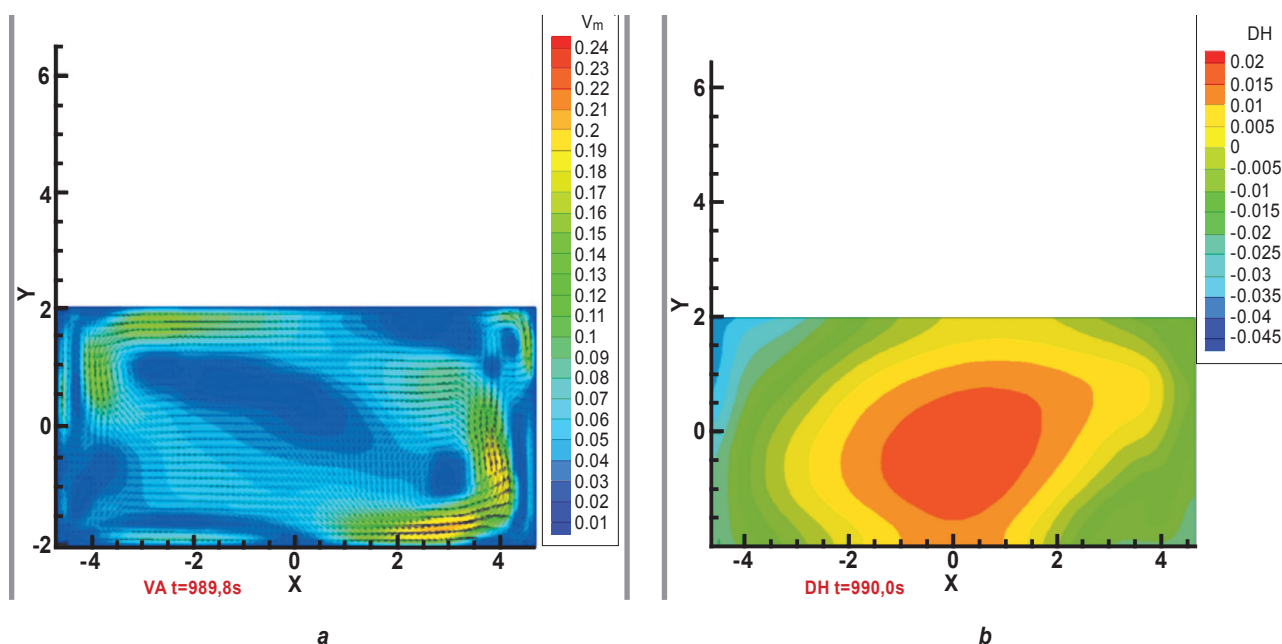


Рис. 12. Результаты для 2-го типа ошиновки с перемычкой:
 а – скорости циркуляции металла; б – перекося металла
 Fig. 12. Results for the 2nd busbar type with a bridge:
 а – metal circulation rates; б – metal distortion

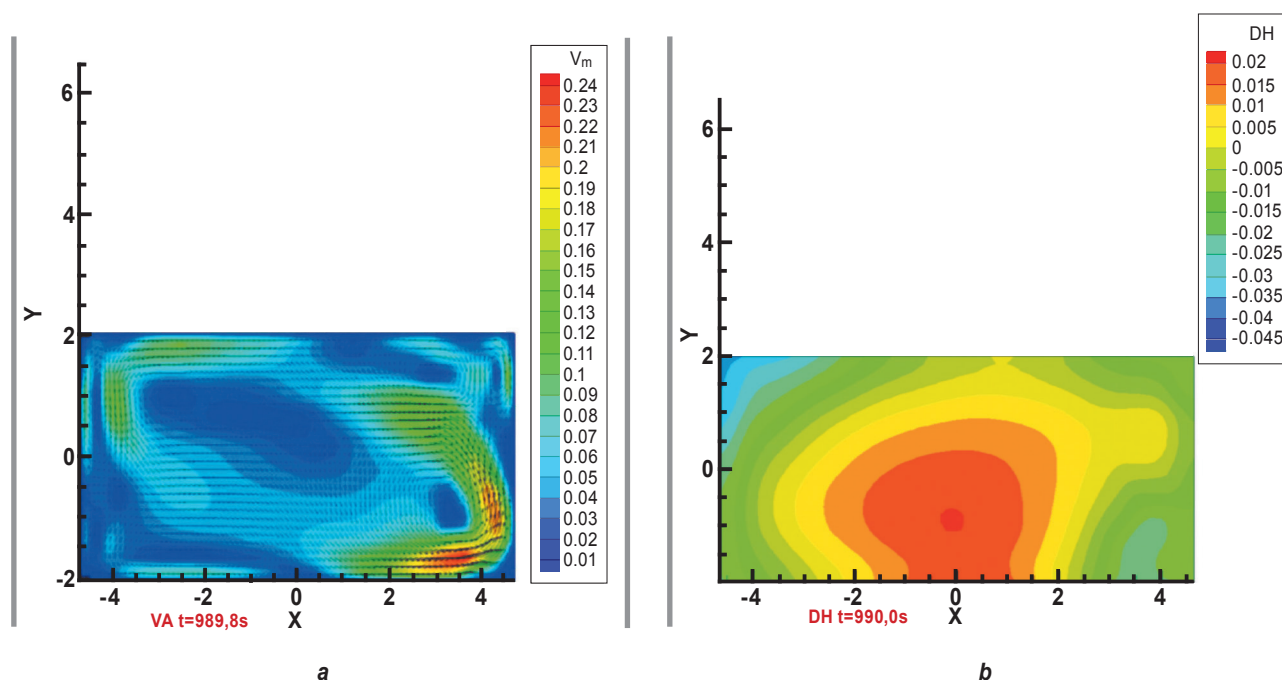


Рис. 13. Результаты для 3-го типа ошиновки без перемычки:
 а – скорости циркуляции; б – перекося металла
 Fig. 13. Simulation results for the 3rd busbar type without a bridge:
 а – circulation rates; б – metal distortion

При использовании 3-го типа ошиновки, согласно данным моделирования (см. рис. 13, 14), в металле преобладают самые большие скорости циркуляции со смещением зеркала металла к глухой стороне.

Для всех вариантов ошиновки характерна многоконтурная система циркуляции катодного металла с преобладанием одного большого контура по центру электролизера. Области с максимальными скоростями циркуляции на-

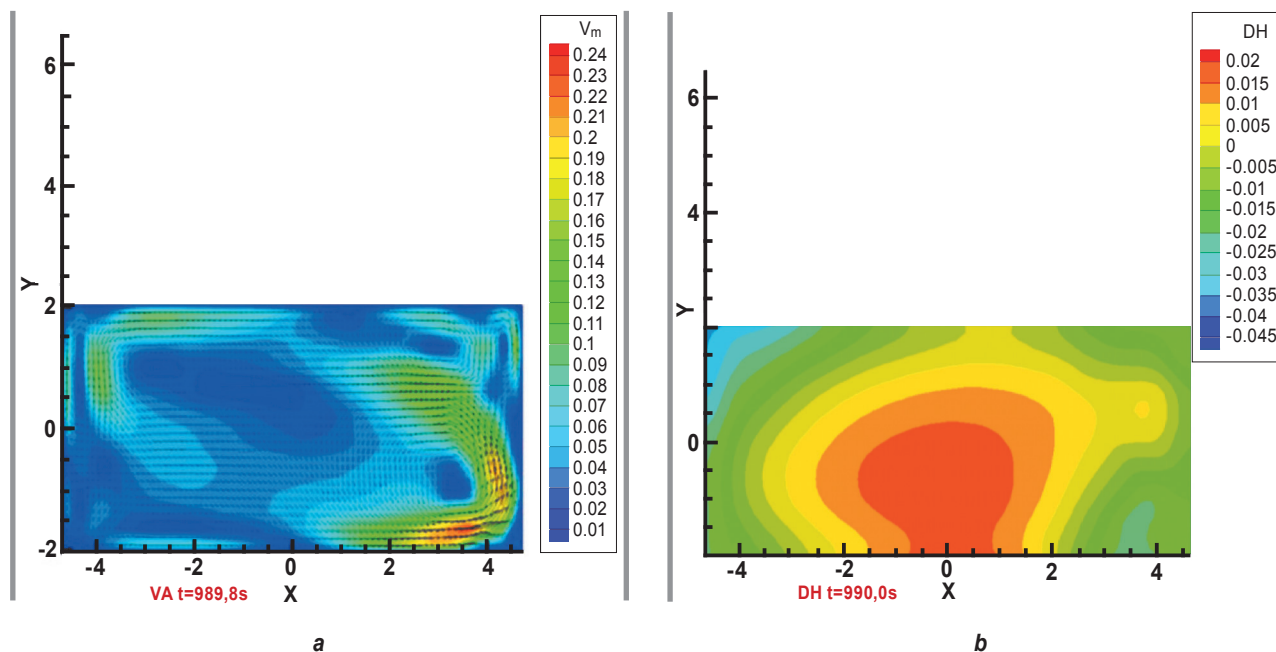


Рис. 14. Результаты для 3 типа ошиновки с перемычкой:
 а – скорости циркуляции; б – перекося металла
 Fig. 14. Results for the 3rd busbar type with a bridge:
 а – circulation rates; б – metal distortion

ходятся ближе к периферии ванны в районе анодных стояков. Форма статического перекося металла имеет ярко выраженный так называемый «пинч-эффект» [33].

На 2-м и 3-м вариантах ошиновок ванн с анодом Содерберга область максимального перекося металла имеет смещение ближе к продольной левой по ходу тока (глухой) стороне электролизера. Такое смещение характерно в большей степени для ванн, имеющих

двухрусную конструкцию катодной ошиновки.

При установке перемычки, которая закольцует между собой ряды анодной ошиновки, снижается перекося металла и уменьшается смещение зеркала от продольной стороны, а также уменьшаются скорости циркуляции металла.

Рассмотренные параметры магнитного поля для 3 вариантов электролизеров, работающих с перемычкой и без, сведены в таблицу.

Рассчитанные данные для 1, 2 и 3 типа ошиновки без перемычки и с перемычкой
 Calculated data for the 1st, 2nd and 3rd busbar types with and without a bridge

Магнитные поля, B_y							
		1 тип		2 тип		3 тип	
Показатель	Единицы измерения	Без перемычки	С перемычкой	Без перемычки	С перемычкой	Без перемычки	С перемычкой
min	мТ	-15,31	-15,32	-15,94	-15,94	-14,55	-14,57
max	мТ	19,33	19,32	18,48	18,48	17,57	17,57
Диапазон	мТ	4,02	4	2,54	2,54	3,02	3
Среднее значение	мТ	0,15	0,1	-0,14	-0,18	-0,2	-0,25
Среднее значение по модулю	мТ	6,23	6,23	6,3	6,3	6	6
Магнитные поля, B_z							
min	мТ	-15,34	-15,27	-15,24	-15,12	-17,16	-17,09
max	мТ	17,12	17,08	16,38	16,7	17,8	17,75
Диапазон	мТ	1,78	1,81	1,14	1,58	0,64	0,66
Среднее значение	мТ	1,78	1,71	1,82	1,77	1,71	1,66
Среднее значение по модулю	мТ	4,49	4,44	4,35	4,31	4,62	4,57

В таблице представлены следующие показатели магнитного поля: максимальные, минимальные значения компоненты B_y магнитного поля, диапазон, среднее значение и среднее значение измеряемых величин по модулю. Для компоненты магнитного поля B_y диапазон значений минимален для 1-го и 3-го типов ошиновки, для 2-го – не изменяется. Для компоненты B_z установка перемычки улучшает средние значения, а на диапазон влияет минимально. Таким образом, характеристики магнитного поля имеют незначительную разницу для представленных вариантов, следовательно, установка перемычки не окажет негативного влияния на работу электролизной ванны.

При использовании на электролизере 1-го типа ошиновки (рис. 15, 16) достигнуты

наилучшие значения распределения тока по бломам с диапазонами (интервалами между максимальным и минимальным значениями), составляющими ~757 А (от 5277,42 до 6034,27) для варианта без перемычки и ~656 А (от 5330,45 до 5986,1) для модернизированного варианта с замкнутыми рядами, и по анодным штырям с диапазонами ~1754 А (от 1770 до 3524) и ~1609 А (от 1836 до 3445) соответственно.

На рис. 17 и 18 представлены результаты моделирования с использованием 2-го типа ошиновки на ванне, где наблюдается худшее токораспределение по анодным штырям: диапазон составляет ~1953 А (от 1722 до 3675) и ~1820 А (от 1759 до 3579) для вариантов без перемычки и с ней соответственно.

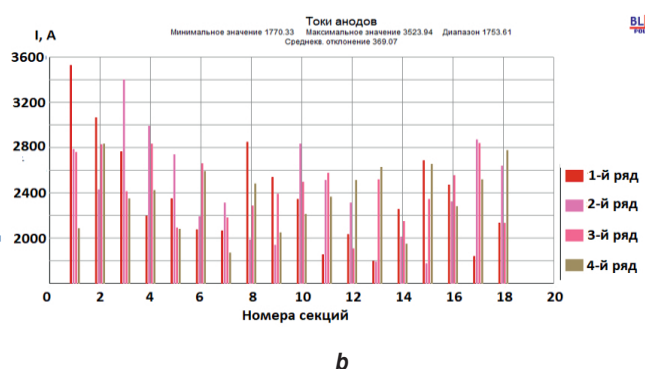
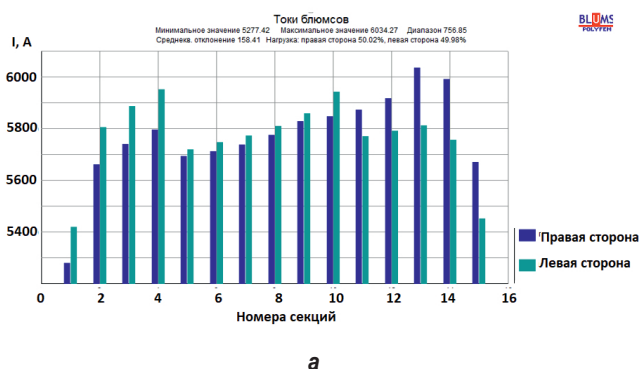


Рис. 15. Рассчитанное токораспределение с использованием 1-го типа ошиновки (без перемычки):
а – по бломам; б – по анодным штырям
Fig. 15. Calculated current distribution using the 1st busbar type (without a bridge):
а – by blums; б – by anode pins

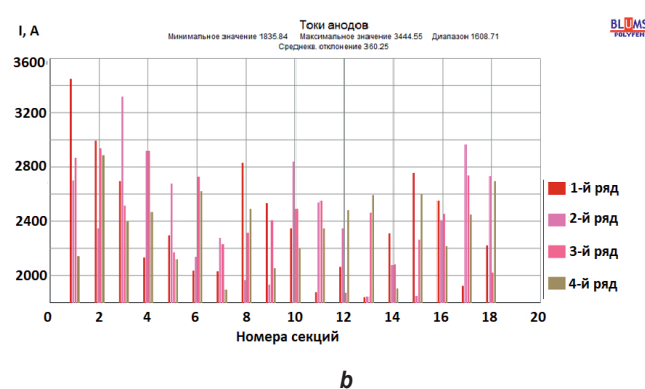
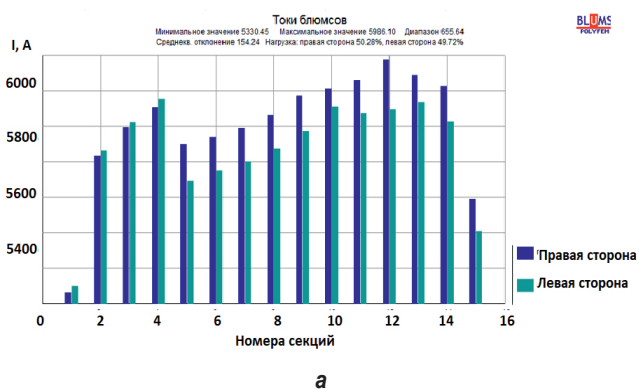


Рис. 16. Рассчитанное токораспределение по 1 типу ошиновки с закольцованными рядами:
а – по бломам; б – по анодным штырям
Fig. 16. Calculated current distribution using the 1st busbar type with looped rows:
а – by blums; б – by anode pins

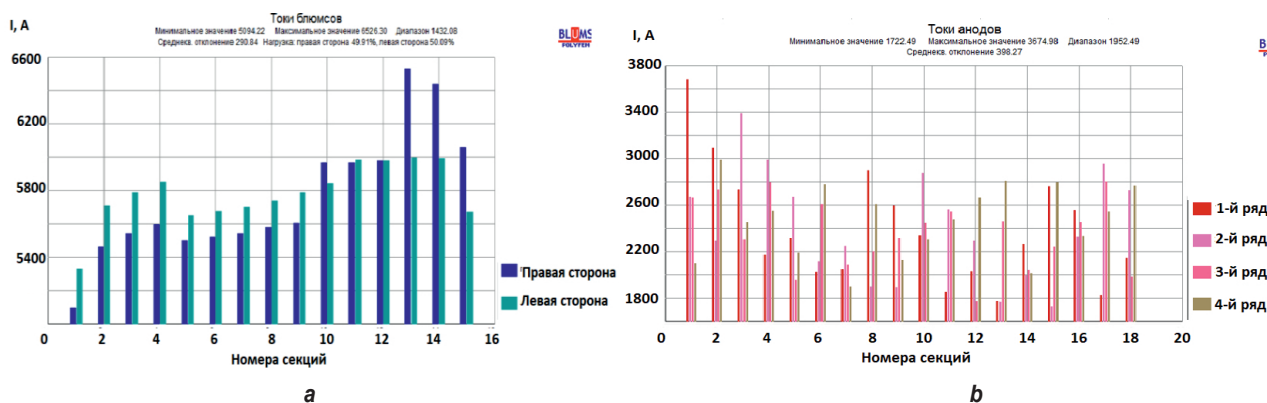


Рис. 17. Рассчитанное токораспределение с использованием 2-го типа ошиновки (без перемычки):

a – по блумсам; b – по анодным штырям

Fig. 17. Calculated current distribution using the 2nd busbar type (without a bridge):

a – by blums; b – by anode pins

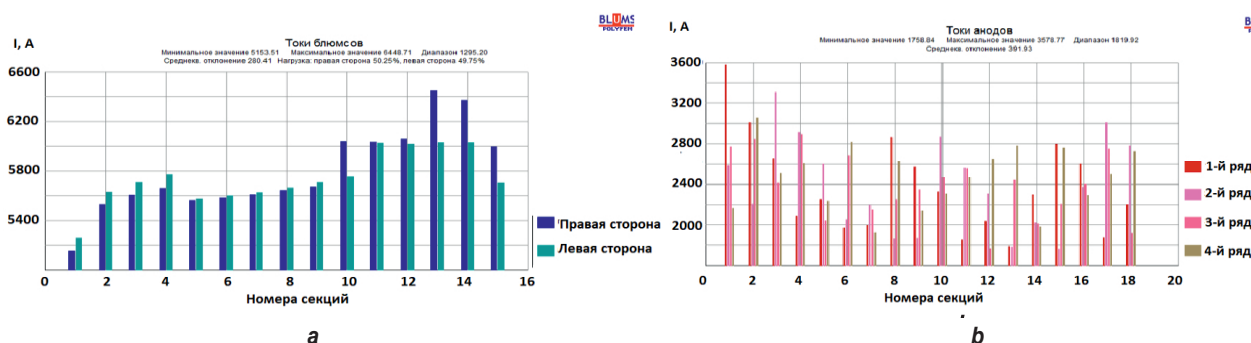


Рис. 18. Рассчитанное токораспределение по 2 типу ошиновки с закольцованными рядами:

a – по блумсам; b – по анодным штырям

Fig. 18. Calculated current distribution using the 2nd busbar type with looped rows:

a – by blums; b – by anode pins

При использовании 3-го типа ошиновки (рис. 19, 20) наблюдается наихудшее распределение тока по блумсам, интервалы которого составляют 2026 А (от 5003 до 7029) для варианта без перемычки и 2046 А (от 5040

до 7086) для модификации с закольцованными рядами. Также это единственный вариант ошиновки, на котором незначительно ухудшается токораспределение после установки перемычки между анодными шинами.

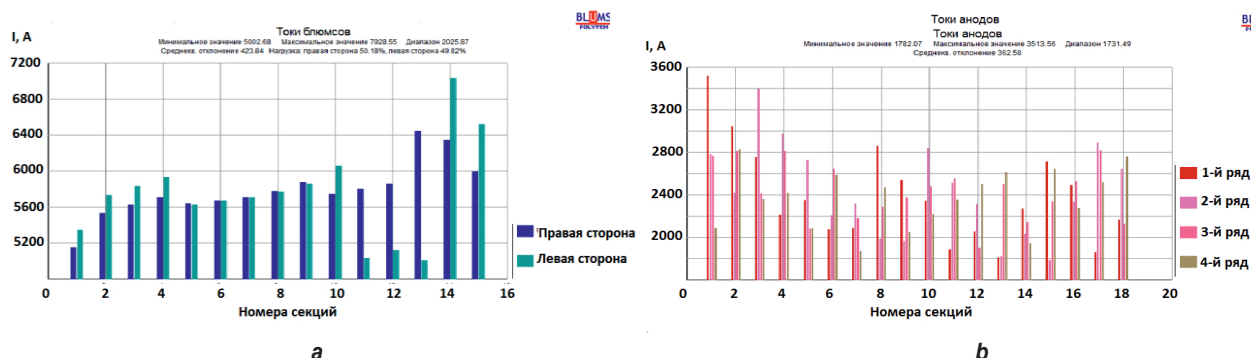


Рис. 19. Рассчитанное токораспределение с использованием 3-го типа ошиновки (без перемычки):

a – по блумсам; b – по анодным штырям

Fig. 19. Calculated current distribution using the 3rd busbar type (without a bridge):

a – by blums; b – by anode pins

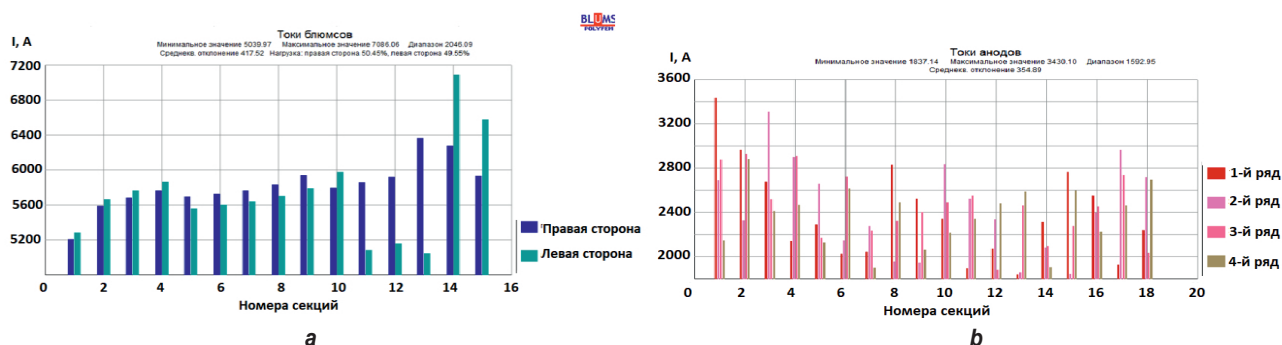


Рис. 20. Рассчитанное токораспределение по 3 типу ошиновки с закольцованными рядами:
 а – по блюмсам; б – по анодным штырям

Fig. 20. Calculated current distribution using the 3rd busbar type with looped rows:
 а – by blums; б – by anode pins

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проект «ЭкоСодерберг» занимает ключевое место в компании по модернизации электролизеров с самообжигающимися анодами. Благодаря замене ванн типа С-8БМ (С-8Б) на ЭкоСодерберг удастся снизить экологическую нагрузку на окружающую среду за счет повышения КПД укрытия и уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу.

При изучении особенностей магнитогидродинамики было проведено математическое моделирование электролизеров С-8БМ для выявления особенностей в работе при использовании ошиновки 3-х разных типов.

Показано, что на электролизере с 1-м типом ошиновки достигается лучшее токораспределение по блюмсам с диапазонами ~757 А (для варианта без перемычки) и ~656 А (для модернизированного варианта с замкнутыми рядами), а также анодным штырям с диапазонами ~1754 А и ~1609 А соответственно.

При использовании 2-го типа ошиновки математическое моделирование показало, что

наблюдается худшее токораспределение по анодным штырям: диапазон составляет ~1953 А и ~1820 А для вариантов без перемычки и с ней.

При использовании 3-го типа ошиновки наблюдается наихудшее распределение тока по блюмсам, интервалы которого составляют 2026 А (для варианта без перемычки) и 2046 А (для модификации с закольцованными рядами). Также это единственный вариант ошиновки, на котором незначительно ухудшается токораспределение после установки перемычки между анодными шинами.

Таким образом, можно сделать вывод, что на 1-м типе ошиновки наблюдается более равномерное токораспределение и выравненные скорости циркуляции и перекося металла, на 3-м типе – более скомпенсированное магнитное поле. Полученные результаты незначительно отличаются друг от друга, что позволяет вносить конструкционные изменения на все виды предлагаемых типов ошиновки при модернизации электролизеров типа С-8Б и С-8БМ на ЭкоСодерберг.

Список источников

1. Shoppert A., Valeev D., Loginova I. Novel method of bauxite treatment using electroreductive Bayer process // Metals. 2023. Vol. 13. Iss. 9. P. 1502. <https://doi.org/10.3390/met13091502>.
2. Шепелев И.И., Головных Н.В., Сахачев А.Ю., Жижаяев А.М., Котлягин А.Г. Улучшение качества спека известняково-нефелиновой шихты путем ввода в нее гипсоангидритового техногенного сырья // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 5. С. 225–239. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-225-239>. EDN: XPSDUL.
3. Александров А.В., Немчинова Н.В. Влияние модульных характеристик спека на извлечение глинозема при переработке нефелиновых руд // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия. 2022. Т. 22. № 4. С. 21–30. <https://doi.org/10.14529/met220403>. EDN: GEQNXN.
4. Dubovikov O.A., Brichkin V.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production // Non-ferrous Metals. 2018. No. 2. P. 11–16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>. EDN: VAYILV.

5. Mann V., Buzunov V., Pitertsev N., Chesnyak V., Polyakov P. Reduction in power consumption at UC RUSAL's Smelters 2012–2014 // *Light Metals* / eds. M. Huland. Cham: Springer, 2015. P. 757–762. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_128. EDN: VADMNZ.
6. Григорьев В.Г., Тепикин С.В., Кузаков А.А., Пьянкин А.П., Тимкина Е.В., Пинаев А.А. Автоматическая подача сырья в производстве алюминия // *Вестник Горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии*. 2017. № 39. С. 97–104. EDN: YVARCO.
7. Радионов Е.Ю., Немчинова Н.В., Третьяков Я.А. Моделирование магнитогидродинамических процессов в электролизерах при получении первичного алюминия // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 7. С. 112–120. EDN: UBLOMB.
8. Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental aspects of UC RUSAL's aluminum smelters sustainable development // *Light Metals* / eds. C. Chesonis. Cham: Springer, 2019. P. 553–563. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70. EDN: SIHUYU.
9. Buzunov V., Mann V., Chichuk E., Frizorger V., Pinaev A., Nikitin E. The first results of the industrial application of the EcoSoderberg technology at the Krasnoyarsk aluminium smelter // *Light metals* / eds. B.A. Sadler. Cham: Springer, 2013. P. 573–576. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch98>. EDN: XXNZDN.
10. Nemchinova N.V., Barauskas A.E., Tyutrin A.A., Vologin V.S. Processing finely dispersed technogenic raw materials for aluminum production in order to extract valuable components // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021. Vol. 62. P. 659–667. <https://doi.org/10.3103/S1067821221060158>. EDN: RHWKMQ.
11. Фризоргер В.К., Шадрин В.Г., Пузин А.В., Виноградов А.М., Аникин В.В., Моренко А.В. [и др.]. Совершенствование системы удаления газов на электролизерах экологического Содерберга // *Алюминий Сибири: сб. науч. статей XVIII Междунар. конф. (г. Красноярск, 5–7 сентября 2012 г.)*. Красноярск: Версо, 2012. С. 408–415.
12. Зенкин Е.Ю., Гавриленко А.А., Немчинова Н.В. О переработке отходов производства первичного алюминия ОАО «РУСАЛ БРАТСК» // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 3. С. 123–132. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-123-132>. EDN: YHPQYD.
13. Чалых В.И., Немчинова Н.В., Аюшин Б.И., Богданов Ю.В. Техничко-экономическое сравнение электролизеров с обожженными анодами и самообжигающимися анодами и верхним токоподводом // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2005. № 2. С. 21–26. EDN: JVUCFH.
14. Виноградов А.М., Пинаев А.А., Виноградов Д.А., Пузин А.В., Шадрин В.Г., Зорько Н.В. [и др.]. Повышение эффективности укрытия электролизеров Содерберга // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2017. № 1. С. 19–30. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>. EDN: XWTXTX
15. Куликов Б.П., Сторожев Ю.И. Пылегазовые выбросы алюминиевых электролизеров с самообжигающимися анодами. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012. 268 с. EDN: SUPCCN.
16. Пат. № 2443804, Российская Федерация, С25С 3/22. Устройство для сбора и удаления газов из алюминиевого электролизера Содерберга / Г.В. Архипов, В.Х. Манн, В.В. Пингин, В.К. Фризоргер, Я.А. Третьяков, А.Г. Архипов, В.Г. Шадрин; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр». № 2010141366/02. Заявл. 08.10.2010; опубл. 27.02.2012. Бюл. № 6.
17. Немчинова Н.В., Радионов Е.Ю., Сомов В.В. Исследование влияния формы рабочего пространства на МГД-параметры работы электролизера производства алюминия // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 1. С. 169–178. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-169-178>. EDN: YYBIOT.
18. Пат. № 2516415, Российская Федерация, С25 С3/16 Способ замены четырехстоячной ошиновки на трехстоячную в алюминиевом электролизере Содерберга / В.В. Пингин, В.В. Платонов, Е.Ю. Радионов, Я.А. Третьяков; заявитель и патентообладатель ООО «Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр». № 2012149277. Заявл. 19.11.2012; опубл. 20.05.2014. Бюл. № 13.
19. Пат. № 2505626, Российская Федерация, С25С 3/16. Ошиновка электролизера для получения алюминия / В.В. Пингин, В.В. Платонов, Е.Ю. Радионов; заявитель и патентообладатель ООО «Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр». № 2012145698/02. Заявл. 25.10.2012; опубл. 27.01.2014. Бюл. № 6.
20. Радионов Е.Ю. Расчет магнитогидродинамических параметров работы электролизеров с различным типом катодного кожуха // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. С. 684–693. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-684-693>. EDN: LRHDLJ.
21. Деркач А.С., Скворцов А.П., Цибуков И.К., Шрамко В.А., Калимов А.Г., Сведенцев М.Л. Трехмерная модель расчета МГД-параметров алюминиевого электролизера // *Цветные металлы*. 2000. № 1. С. 30–34.
22. Bojarevics V. MHD of aluminium cells with the effect of channels and cathode perturbation elements // *Light metals* / eds. B.A. Sadler. Cham: Springer, 2013. P. 609–614. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65136-1_104.
23. Бояревич В.В., Калис Х.Э., Миллере Р.П., Пагодина И.Э. Математическая модель для расчета параметров алюминиевого электролизера // *Цветные металлы*. 1988. № 7. С. 63–66.
24. Крюковский В.А., Миневич Л.И. Применение математического моделирования в оптимизации магнитных полей электролизеров // *Цветные металлы*. 1996. № 6. С. 40–42.
25. Меерович Э.А. Магнитное поле и электродинамические силы в зоне расплава мощных электролизеров алюминия. М.: Изд. АН СССР, 1962. 124 с.
26. Пингин В.В. Исследование теплосиловых и магнитогидродинамических явлений в электролизерах // *Алюминий Сибири-96: сб. тр. Междунар. научного семинара (г. Красноярск, сентябрь 1997 г.)*. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 1997. 315 с.

27. Бегунов А.И. Газогидродинамика и потери металла в алюминиевых электролизерах. Иркутск: Иркутский ун-т, 1992. 286 с.
28. Fraser K.J., Billingham D., Chen K.L., Keniry J.T. Some application of mathematical modelling of electric current distributions in Hall-Heroult cells // *Light Metals*. Cham: Springer, 1989. P. 219–226.
29. Пингин В.В., Третьяков Я.А., Радионов Е.Ю., Немчинова Н.В. Перспективы модернизации ошиновки электролизера С-8БМ (С-8Б) // *Цветные металлы*. 2016. № 3. С. 35–41. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.03.06>. EDN: WBFSDP.
30. Кирко В.И., Галемов Т.Т., Петров А.М. Соединение алюминиевых деталей ошиновки электролизера «гибкий катодный спуск – катодная шина» // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технология*. 2013. Т. 6. № 5. С. 534–542. EDN: RAQRXV.
31. Пат. № 2295589, Российская Федерация, С25С 3/06, С25С 3/16. Ошиновка алюминиевых электролизеров / В.В. Васильевич, Ю.В. Богданов, Б.И. Аюшин, Л.В. Рагозин, Ю.В. Шемет, А.М. Надточий, О.М. Сапожников, А.В. Ермаков; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Сибирский научно-исследовательский, конструкторский и проектный институт алюминиевой и электродной промышленности» (ОАО «СибВАМИ»). № 2005129387. Заявл. 20.09.2005; опубл. 20.03.2007. Бюл. № 8.
32. Пат. № 2682507, Российская Федерация, С25С 3/12. Способ снижения контактного напряжения в алюминиевом электролизере / П.В. Поляков, С.Г. Шахрай, И.И. Пузанов, Ю.Г. Михалев, А.В. Завадяк, В.А. Крюковский, Ю.Н. Попов, А.А. Поляков, А.С. Ясинский; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». № 2018101004. Заявл. 10.01.2018; опубл. 19.03.2019. Бюл. № 8.
33. Троицкий О.А. Электропластический эффект в металлах // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2018. № 9. С. 65–76. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2018-9-65-76>. EDN: UZUIHY.

References

1. Shoppert A., Valeev D., Loginova I. Novel method of bauxite treatment using electroreductive Bayer process. *Metals*. 2023;13(9):1502. <https://doi.org/10.3390/met13091502>.
2. Shepelev I.I., Golovnykh N.V., Sakhachev A.Yu., Zhyzhaev A.M., Kotlyagin A.G. Improving limestone-nepheline charge sinter quality by gypsum anhydrate technogenic raw material introduction. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(5):225-239. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-225-239>. EDN: XPSDUL.
3. Aleksandrov A.V., Nemchinova N.V. Impact of modular sinter characteristics on the extraction of alumina when processing nepheline ores. *Vestnik Yuzhno Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya = Bulletin of the South Ural state University. Series: Metallurgy*. 2022;22(4):21-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/met220403>. EDN: XPSDUL.
4. Dubovikov O.A., Brichkin V.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production. *Non-ferrous Metals*. 2018;2:11-16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>. EDN: VAYILV.
5. Mann V., Buzunov V., Pitertsev N., Chesnyak V., Polyakov P. Reduction in power consumption at UC RUSAL's smelters 2012–2014. In: Huland M. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2015, p. 757-762. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_128. EDN: VADMNZ.
6. Grigoriev V.G., Tepikin S.V., Kuzakov A.A., Pyankin A.P., Timkina E.V., Pinaev A.A. Automatic feed of raw materials in aluminum production. *Vestnik Gorno-metallurgicheskoy sekcii Rossijskoj akademii estestvennyh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2017;39:97-104. (In Russ.). EDN: YVARCO.
7. Radionov E.Yu., Nemchinova N.V., Tretiakov Ya.A. Magnetohydrodynamic processes modeling in electrolyzers at primary aluminum production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;7:112-120. (In Russ.). EDN: UBLOMB.
8. Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental aspects of UC RUSAL's aluminum smelters sustainable development. In: Chesonis C. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2019, p. 553-563. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70. EDN: SIHUYU.
9. Buzunov V., Mann V., Chichuk E., Frizorger V., Pinaev A., Nikitin E. The first results of the industrial application of the EcoSoderberg technology at the Krasnoyarsk aluminium smelter. In: Sadler B.A (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2013, p. 573-576. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch98>. EDN: XXNZDN.
10. Nemchinova N.V., Barauskas A.E., Tyutrin A.A., Vologin V.S. Processing finely dispersed technogenic raw materials for aluminum production in order to extract valuable components. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021;62:659-667. <https://doi.org/10.3103/S1067821221060158>. EDN: RHWKMQ.
11. Frizorger V.K., Shadrin V.G., Puzin A.V., Vinogradov A.M., Anikin V.V., Morenko A.V., et al. Improving a gas removal system at ecological Soderbergh electrolyzers. In: *Alyuminiy Sibiri: sbornik nauchnyh statej XVIII Mezhdunarodnoj konferencii = Aluminum of Siberia: collected scientific articles of the 18th International Conference*. 5–7 September 2012, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Verso; 2012, p. 408-415. (In Russ.).
12. Zenkin E.Yu., Gavrilenko A.A., Nemchinova N.V. On «RUSAL Bratsk» JSC primary aluminum production waste recycling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(3):123-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-123-132>. EDN: YHPQYD.
13. Chalykh V.I., Nemchinova N.V., Ayushin B.I., Bogdanov Yu.V. Technical and economic comparison of electrolyzers with baked anodes and self-baking anodes and upper current carrier. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. NonFerrous Metallurgy*. 2005;2:21-26. (In Russ.). EDN: JVUCFH.

14. Vinogradov A.M., Pinaev A.A., Vinogradov D.A., Puzin A.V., Shadrin V.G., Zor'ko N.V., et al. Increasing covering efficiency of Soderberg cells. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2017;1:19-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>. EDN: XWTXTX.
15. Kulikov B.P., Storozhev Yu.I. *Dust and gas emissions from aluminum electrolyzers with self-baking anodes*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2012, 268 p. (In Russ.). EDN: SUPCCH.
16. Arkhipov G.V., Mann V.H., Pingin V.V., Frizorger V.K., Tretyakov Ya.A., Arkhipov A.G., Shadrin V.G. *Device for gas collection and removal from Soderbergh aluminum electrolyzers*. Patent RF, no. 2443804; 2012. (In Russ.).
17. Nemchinova N.V., Radionov E.Yu., Somov V.V. Studying working space shape effect on electrolyzer MHD parameters at aluminum production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):169-178. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-169-178>. EDN: YYBIOT.
18. Pingin V.V., Platonov V.V., Radionov E.Yu., Tretyakov Ya.A. *Method of replacing a four-pin busbar with a three-pin one in an aluminum Soderberg electrolyzer*. Patent RF, no. 2516415; 2014. (In Russ.).
19. Pingin V.V., Platonov V.V., Radionov E.Yu. *Electrolyzer busbar for aluminum production*. Patent RF, no. 2505626; 2014. (In Russ.).
20. Radionov E.Yu. Calculation of magnetohydrodynamic electrolyser parameters with various types of cathode shell. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(3):684-693 P. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-684-693>. EDN: LRHDLJ.
21. Derkach A.S., Skvortsov A.P., Tsibukov I.K., Shramko V.A., Kalimov A.G., Swedentsev M.L. A three-dimensional model for calculating aluminum electrolyzer MHD parameters. *Tsvetnye Metally*. 2000;1:30-34. (In Russ.).
22. Bojarevics V. MHD of aluminium cells with the effect of channels and cathode perturbation elements. In: Chesonis C. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2013, p. 609-614. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65136-1_104.
23. Boyarevich V.V., Kalis H.E., Miller R.P., Pagodina I.E. A mathematical model for calculating the parameters of an aluminum electrolyzer. *Tsvetnye Metally*. 1988;7:63-66.
24. Kryukovsky V.A., Minevich L.I. Using mathematical modeling in electrolyzer magnetic field optimization. *Tsvetnye Metally*. 1996;6:40-42. (In Russ.).
25. Meerovich E.A. *Magnetic field and electrodynamic forces in the melt zone of high-power aluminum electrolyzers*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1962, 124 p. (In Russ.).
26. Pingin V.V. Study of thermoelectric and magnetohydrodynamic phenomena in electrolyzers. In: *Aluminum of Siberia-96: proceedings of the International Scientific Seminar*. September 1997, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 1997, 315 p. (In Russ.).
27. Begunov A.I. *Gasohydrodynamics and metal losses in aluminium electrolytic cells*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 1992, 286 p. (In Russ.).
28. Fraser K.J., Billingham D., Chen K.L., Keniry J.T. Some application of mathematical modelling of electric current distributions in Hall-Heroult cells. In: *Light Metals*. Cham: Springer; 1989, p. 219-226.
29. Pingin V.V., Tretyakov Ya.A., Radionov E.Yu., Nemchinova N.V. Modernization prospects for the bus arrangement of electrolyzer S-8BM (S-8B). *Tsvetnye Metally*. 2016;3:35-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.03.06>. EDN: WBFSDP.
30. Kirko V.I., Galemov T.T., Petrov A.M. Aluminum busbar connection parts of the cell «Flexible cathode descent – cathode bus». *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2013;6(5):534-542. (In Russ.). EDN: RAQRXV.
31. Vasilyevich V.V., Bogdanov Yu.V., Ayushin B.I., Ragozin L.V., Shemet Yu.V., Nadochiy A.M., Sapozhnikov O.M., Ermakov A.V. *Busbar arrangement of aluminum electrolyzers*. Patent RF, no. 2295589; 2007. (In Russ.).
32. Polyakov P.V., Shakhrai S.G., Puzanov I.I., Mikhalev Yu.G., Zavadyak A.V., Kryukovsky V.A., Popov Yu.N., Polyakov A.A., Yasinsky A.S. *A method to reduce contact voltage in an aluminum electrolyzer*. Patent RF, no. 2682507; 2019. (In Russ.).
33. Troitskiy O.A. Electroplastic effect in metals. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Bulletin of scientific, technical and economic information*. 2018;9:65-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2018-9-65-76>. EDN: UZUIHY.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пинаев Андрей Александрович,
заместитель директора
по природоохранным технологиям,
ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр»,
660111, г. Красноярск, ул. Пограничников, 37/1, Россия
Andrey.Pinaev@rusal.com

Радионон Евгений Юрьевич,
кандидат технических наук,
начальник отдела разработки
ошиновки и измерений,
ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр»,
660111, г. Красноярск, ул. Пограничников, 37/1, Россия
evgeniy.radionov@rusal.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey A. Pinaev,
Deputy Director
for Environmental technologies,
RUSAL Engineering and Technology Center LLC,
37/1, Pogranichnikov St., Krasnoyarsk 660111, Russia
Andrey.Pinaev@rusal.com

Evgeniy Yu. Radionov,
Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Busbars and Measurements Development
Department,
RUSAL Engineering and Technology Center LLC,
37/1, Pogranichnikov St., Krasnoyarsk 660111, Russia
evgeniy.radionov@rusal.com

Орлов Иван Александрович,
менеджер отдела разработки
ошиновки и измерений,
ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр»,
660111, г. Красноярск, ул. Пограничников, 37/1, Россия
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
fainafaina262@gmail.com

Ivan A. Orlov,
Manager of the Busbars and Measurements Development
Department,
RUSAL Engineering and Technology Center LLC,
37/1, Pogranichnikov St., Krasnoyarsk 660111, Russia;
Master's Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
fainafaina262@gmail.com

Немчинова Нина Владимировна,
д.т.н., профессор,
заведующая кафедрой металлургии
цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ ninavn@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

Nina V. Nemchinova,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ ninavn@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

Вклад авторов

Пинаев А.А. осуществлял руководство исследованиями. Радионов Е.Ю. предложил идею для исследований, руководил моделированием и вводом исходных данных для моделирования, обобщил полученные результаты, сделал выводы. Орлов И.А. выполнил подбор исходных данных для моделирования, литературных источников по тематике исследования и провел с помощью компьютерных программ моделирование электролизеров с различными видами ошинок. Немчинова Н.В. осуществила подбор литературных источников по тематике исследования и провела общее редактирование текста рукописи.

Contribution of the authors

Pinaev A.A. supervised the research. Radionov E.Yu. put forward an idea for research, supervised the modeling and input of initial modeling data, summarized the results obtained and derived conclusions. Orlov I.A. selected initial modeling data, literary sources on the research topic, carried out computer modeling of electrolyzers with various types of busbars. Nemchinova N.V. selected literary sources on the research topic and performed general editing of the manuscript.

Конфликт интересов

Немчинова Нина Владимировна является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2000 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Conflict of interests

Nina V. Nemchinova has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2000, but she was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors did not report any other conflicts of interest.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.01.2024 г.; одобрена после рецензирования 15.02.2024 г.; принята к публикации 20.02.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 20.01.2024 г.; approved after reviewing 15.02.2024 г.; accepted for publication 20.02.2024 г.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 544.42:542.61:546.47

EDN: UHVJQT

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-178-189



Кинетические закономерности выщелачивания цинка из промпродуктов

С.А. Якорнов^{1✉}, Г.И. Мальцев², Р.С. Воинков³, А.А. Гребнева⁴¹ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», г. Верхняя Пышма, Россия²⁻⁴Акционерное общество «Уралэлектромедь», г. Верхняя Пышма, Россия³Технический университет Уральской горно-металлургической компании, г. Верхняя Пышма, Россия

Резюме. Целью работы являлось изучение кинетических закономерностей выщелачивания цинка из соединения $\text{CaO}\cdot\text{ZnO}$, образующегося при спекании пыли электродуговых печей с известняком, а также выявление механизмов, по которым протекают химические взаимодействия. Объектом исследования служил спек пыли электродуговых печей с известняком, полученный на Челябинском цинковом заводе. Установлено, что цинк в спеке содержится в виде легкорастворимого $\text{CaO}\cdot\text{ZnO}$. Элементный состав исходных пылей и спека с известняком определяли спектральным атомно-эмиссионным способом с использованием различных источников возбуждения спектра: индуктивно-связанной плазмы на оптико-эмиссионном приборе «Spectroblue»; искровой спектрометрии. Фазовый состав материалов изучали на рентгенофазовом дифрактометре «Bruker D8 Advance». Исходный спек измельчали до порошкообразного состояния с размером частиц $\sim 0,04$ мм и выходом $\sim 97\%$ -го состава, %: 11,9 Zn; 28,5 Ca; 16,6 Fe; 0,38 Mg; 0,14 Pb; $< 0,05$ Cl. Опыты по выщелачиванию Zn раствором едкого натра проводили при следующих параметрах: исходная концентрация цинка в пульпе была $0,202$ г-ион/дм³; концентрация щелочи – $5\text{--}9$ моль/дм³ NaOH; Ж:Т = 9:1; скорость перемешивания пульпы – $10\text{--}20$ рад·с⁻¹; температура – $333\text{--}363$ К; продолжительность – $0,5\text{--}2,5$ ч. Показано, что цинк из спека переходит в раствор в виде тетрагидроксоцинката натрия $\text{Na}_2[\text{Zn}(\text{OH})_4]$, а кальций остается в кеке, в основном в виде малорастворимого гидроксида $\text{Ca}(\text{OH})_2$, который взаимодействует с углекислым газом с образованием нерастворимого карбоната кальция CaCO_3 . Установлено, что процесс выщелачивания цинка из спека соответствует внешнедиффузионному режиму взаимного переноса исходных реагентов и продуктов реакции через поверхностный слой жидкости на границе раздела фаз «жидкость–твердое» с величиной энергии активации равной $12,44$ кДж/моль. Таким образом, при исследованных параметрах выщелачивания цинка раствором NaOH процесс протекает во внешнедиффузионном режиме. Представляет интерес выявление условий, соответствующих внутридиффузионному и кинетическому режимам выщелачивания цинка.

Ключевые слова: пыли электродуговых печей, известняк, обжиг, цинк, выщелачивание, едкий натр

Для цитирования: Якорнов С.А., Мальцев Г.И., Воинков Р.С., Гребнева А.А. Кинетические закономерности выщелачивания цинка из промпродуктов // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 178–189. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-178-189>. EDN: UHVJQT.

METALLURGY

Original article

Kinetics of zinc leaching from intermediate feedstocks

Sergey A. Yakornov^{1✉}, Gennady I. Maltsev², Roman S. Voinkov³, Anna A. Grebneva⁴¹Ural Mining & Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia²⁻⁴Joint Stock Company Uralelectromed, Verkhnyaya Pyshma, Russia³Technical University of the Ural Mining and Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia

Abstract. The aim of the work was to study the leaching kinetics of zinc from the compound $\text{CaO}\cdot\text{ZnO}$, formed during the sintering of dust from electric arc furnaces with limestone, as well as to identify the mechanisms by means which such chemical interactions occur. The object of the study was the dust sinter of electric arc furnaces with limestone obtained at the Chelyabinsk Zinc Plant. It was found that zinc is contained in sinter in the form of readily soluble $\text{CaO}\cdot\text{ZnO}$. The elemental composition of the initial dusts and sinter was determined by the spectral atomic emission method using inductively coupled plasma on a Spectroblue optical emission device and spark spectrometry. The phase composition of the materials was studied on a Bruker D8 Advance X-ray diffractometer. The initial sinter was milled to a

powder state having a particle size of ~ 0.04 mm and with a yield of $\sim 97\%$ of the composition, %: 11.9 Zn; 28.5 Ca; 16.6 Fe; 0.38 Mg; 0.14 Pb; 0.05 Cl. Experiments on the leaching of Zn with NaOH solution were carried out at the following parameters: the initial concentration of zinc in the pulp was 0.202 g-ion/dm^3 ; alkali concentration – $5\text{--}9 \text{ mol/dm}^3$ NaOH; L:S = 9:1; pulp mixing rate – $10\text{--}20 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$; temperature – $333\text{--}363 \text{ K}$; duration – $0.5\text{--}2.5$ hours. It has been shown that zinc from sinter passes into solution as sodium tetrahydroxozincate $\text{Na}_2[\text{Zn}(\text{OH})_4]$, while calcium remains in the cake, mainly as insoluble $\text{Ca}(\text{OH})_2$, which reacts with carbon dioxide to form insoluble calcium carbonate CaCO_3 . The process of dissolving zinc from the sinter corresponds to the external diffusion mode of mutual transfer of the initial reagents and reaction products through the surface layer of the liquid at the interface of the “liquid–solid” phases with an activation energy value equal to 12.44 kJ/mol . Thus, with the studied parameters of zinc leaching with NaOH solution, the process proceeds in an external diffusion mode. The results are of interest when identifying conditions corresponding to the intradiffusion and kinetic modes of zinc leaching.

Keywords: electric arc furnace dust, limestone, roasting, zinc, leaching, caustic soda

For citation: Yakornov S.A., Maltsev G.I., Voinkov R.S., Grebneva A.A. Kinetics of zinc leaching from intermediate feedstocks. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):178-189. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-178-189>. EDN: UHVJQT.

ВВЕДЕНИЕ

Переработка вторичного металлургического сырья представляет значительный интерес наряду с рудными материалами, поскольку позволяет минимизировать капитальные и технологические расходы, снизить экологические риски, что определяет актуальность исследуемой темы [1]. Цинксодержащие продукты металлургического производства представляют высокую экологическую опасность, оставаясь потенциальным альтернативным источником цинка и сопутствующих металлов. Для извлечения цинка широко используют гидрометаллургическую переработку техногенного сырья [2]. Оксид цинка достаточно легко растворяется в интервале pH 2–4. Концентрация Zn^{2+} в неподвижной среде на поверхности частиц ZnO значительно ниже, чем его растворимость. Вероятно, гидроксидные анионы, высвобождающиеся при растворении, накапливаются на поверхности положительно заряженной поверхности ZnO, и кинетика растворения в основном контролируется диффузией ионов H^+ из объема раствора к поверхности ZnO [3]. Крупные частицы ZnO переходят в раствор в процессе, ограниченном реакцией в соответствии с их удельной поверхностью. Мелкие агрегированные частицы растворяются в 2 этапа: ограниченное реакцией растворения на поверхности первичных частиц ZnO с последующей диффузией в неподвижной жидкой среде между первичными частицами в перемешиваемую объемную водную среду. Предложена реакционно-диффузионная модель кинетики [4]. Для переработки Zn-Co шлака предлагается разделение цинка и кобальта с использованием ионной жидкости, функционализированной карбоксилами ($[\text{Hbet}][\text{Tf}_2\text{N}]$).

Степень перехода в раствор оксида цинка составляет 92,6% при 90°C и 60 мин, тогда как выщелачивание из шлака кобальта (5,37%) и марганца (0,05%) незначительно [5]. В сопоставимых условиях растворимость ZnSO_4 выше, чем ZnO [6]. Пыль электродуговых печей перерабатывают различными способами: смешивают с поливинилхлоридом и подвергают термической обработке при температуре 300°C в потоке воздуха с последующей обработкой твердого остатка в воде при pH 5,6 и температуре 50°C , что привело к 100%-му извлечению цинка в раствор выщелачивания при оптимальных условиях, в то время как извлечение железа было близко к 0% [7]; предлагается извлечение цинка и отделение железа в одну стадию путем совместного обжига пыли с NH_4HSO_4 с последующей обработкой водой, оптимальными условиями были массовое соотношение $\text{NH}_4\text{HSO}_4/\text{EAFD}$, равное 0,75, температура обжига 600°C , время выдержки 3 ч и время выщелачивания 1 ч, при котором извлекалось в раствор 91,14% Zn и 3,25% Fe [8]. Для селективного отделения и извлечения цинка из доменной пыли предложено: а) выщелачивание раствором NH_4Cl , когда ZnO и ZnSO_4 преобразуют в координационные соединения цинк-хлор (ZnCl_i^{2-i} , $i = 1, 2, 3, 4$) при совместном действии ионов NH_4^{4+} и Cl^- , степень выщелачивания цинка достигла 85,64% [9]; б) выделение Zn и Fe/C с помощью системы «хлористый натрий-хлористый водород-вода»; количественное разделение и извлечение Zn и Fe/C достигнуто с помощью хлористого цинка (ZnCl_i^{2-i} ($i = 0, 1, 2, 3, 4$)) по методике совместного выщелачивания с использованием 3 моль/дм³ NaCl при pH = 4, соотношении Ж/Т = 4, температуре 70°C , концентрации HCl 0,25 моль/дм³ и продолжи-

тельности 2 ч; степень выщелачивания цинка составила 93,2% [10].

Цинк в конвертерной пыли присутствует в виде инертного ZnFe_2O_4 , что затрудняет его выщелачивание. Представлен метод кислородного выщелачивания под давлением для селективного выщелачивания Zn из пыли. При этом процессе эффективно стимулируется разложение ZnFe_2O_4 , кроме того, Fe^{2+} в растворе окисляется и гидролизует до твердого $\text{Fe}(\text{OH})\text{SO}_4$. При оптимальных условиях эффективность выщелачивания цинка достигала 98,8%, а в кеке оставалось 86,3% Fe, что обеспечивает разделение Zn и Fe [11]. Шлаковая германийсодержащая пыль содержит 49,65% Zn и обрабатывается путем кислотного выщелачивания, обогащенного кислородом, в ультразвуковой среде. Степень выщелачивания Zn и Ge достигает 96,66% и 92,96%, что на 4,92% и 9,80% выше, чем при обычном методе кислотной обработки пыли, соответственно, благодаря хорошему синергетическому эффекту ультразвука и кислорода. Процесс выщелачивания цинка и германия контролируется смешанным режимом диффузии и химической реакции, а энергии активации Zn и Ge составляют 14,996 и 23,133 кДж/моль соответственно. Ультразвук в сочетании с кислородным выщелачиванием может улучшить кинетику и снизить энергию активации реакции [12].

Выщелачивание галлия и цинка из корундовой дымовой пыли показало, что при концентрации серной кислоты 25 масс. % H_2SO_4 , температуре 90°C и продолжительности 50 мин эффективность выщелачивания Ga и Zn может быть увеличена с 62,78 до 82,5%, и с 94,43 до 99,57% – при использовании ультразвука соответственно. Кинетический анализ показал, что выщелачивание Ga из пыли контролируется смесью диффузионных и химических реакций, а выщелачивание Zn контролируется диффузией [13]. Предложено серноокислотная обработка феррита цинка с порошком меди. Продолжительность полного разложения феррита цинка составила 10 мин при 80°C в условиях: молярное соотношение меди и феррита цинка 1,5; 100 г/дм³ H_2SO_4 ; Ж/Т = 30 см³/г; порошок меди 27,15% фракции +38,5–20 мкм. Процесс контролируется поверхностной химической реакцией; кажущиеся энергии активации для Zn, Fe и Cu составляют 56, 56 и 50 кДж/моль соответственно [14]. Для повышения извлечения цинка из Zn-пыли использован селективный восстановительный обжиг при 600°C, для

разложения феррита ZnFe_2O_4 с получением кислоторастворимого ZnO, который сочетался с выщелачиванием водой при Ж/Т = 10; 80 г/дм³ H_2SO_4 ; степень выщелачивания составила 92,24%, по сравнению с 87,76% при прямом выщелачивании [15]. Оптимальные условия выщелачивания пыли оксида цинка путем окисления озоном в серноокислотной системе составили: продолжительность озонирования 10 мин; температура выщелачивания 90°C; начальная кислотность 160 г/дм³; продолжительность выщелачивания 60 мин; Ж/Т = 7.

При оптимальных условиях степень выщелачивания, %: 95,79 Zn; 93,65 Ge [16]. Изучено гидротермальное аммиачное выщелачивание Zn из пылей вторичного ZnO; в раствор перешел преимущественно оксид цинка; добавка аммонийной соли способствовала выщелачиванию сульфида цинка; выщелачивание цинка составило 93,4% при оптимальных условиях [17]. Селективно выщелачивают цинк из низкосортного карбонатного сырья с использованием экологически безопасного реагента – глицина. При оптимальных условиях наблюдались: концентрация глицина 1,5 М; pH 9,5; температура 70°C. Выщелачивалось более 90% Zn при незначительном извлечении основных примесей [18]. Разработан новый процесс восстановительного выщелачивания индийсодержащего цинкового остатка с использованием галенита в качестве восстановителя для интенсивного растворения Zn и In. Лимитирует процесс поверхностная химическая реакция – кажущаяся энергия активации выщелачивания In составила 64 кДж/моль, порядок реакции равен –0,34 и 1,47 в зависимости от размера частиц и начальной концентрации H_2SO_4 , соответственно. Степень выщелачивания, %: 87 Zn; 91 Fe; 88 In, через 90 мин при 85°C, начальная концентрация H_2SO_4 140 г/дм³, $\text{PbS}/\text{ZnFe}_2\text{O}_4 = 1$ моль/моль [19]. Разработан комбинированный процесс сульфидного обжига и выщелачивания цинка раствором HCl для обогащенного цинком шлама. Оптимальные условия: дозировка угольного порошка 15%; температура 700°C; продолжительность 60 мин. В этих условиях 95,48% цинка, содержащегося в остатках, было преобразовано в сульфиды; сульфат кальция был переведен в кальцит и сульфид кальция. Затем прокаленный образец подвергали выщелачиванию с HCl для отделения кальция и цинка.

Кальций на 93,75% был извлечен при оптимальных условиях: концентрация HCl

3 моль/дм³; Ж/Т = 5 см³/г; температура 25°C; продолжительность 10 мин. После выщелачивания HCl цинк на 97,37% был сконцентрирован в остатке выщелачивания с содержанием 45,86% Zn [20]. Фитоэкстракция была применена для извлечения цинка, свинца, никеля и кадмия растением *Amaranthus retroflexus*. Смесь из 25 масс. % остатка от выщелачивания цинка + 75 масс. % почвы была определена как оптимальное состояние. Индекс извлечения фитометаллов (отношение содержания металла в высушенном растении к содержанию металла в хвостах) в оптимальных условиях составил, %: 17,09 Zn; 7,60 Pb; 27,57 Ni; 59,05 Cd [21]. Изучалась эффективность выщелачивания умеренно термофильных консорциумов (*Leptospirillum ferriphilum* + *Acidithiobacillus caldus* + *Sulfobacillus benefaciens*) мелкодисперсной Pb-Zn сульфидной руды. Под действием этого консорциума скорость выщелачивания Zn достигла 96,4% за 8 дней и 100% через 12 дней. Бактериальное выщелачивание снижает потенциальную токсичность мелкодисперсной сульфидной руды-сырца для окружающей среды [22]. Остатки от выщелачивания цинка представляют собой отходы с трудоемкой обработкой, экологической опасностью и высоким выходом, их безвредная и экономичная переработка различными доступными методами представляет собой серьезную проблему. Представлен метод микрокристаллизации для переработки остатков выщелачивания цинка в стеклокерамику с хорошей производительностью и высоким выходом. Тяжелые металлы, содержащиеся в сырье, хорошо затвердели в стеклокерамике, что исключило высокую опасность тяжелых металлов и других компонентов для окружающей среды [23].

Целью выполненного исследования являлось выявление кинетических закономерностей выщелачивания цинка из CaO·ZnO, образующегося при спекании пыли электродуговых печей с известняком, выявление механизмов, по которым протекают химические взаимодействия, что может дать возможность наиболее эффективно влиять на скорость той или иной стадии процесса, минимизируя трудоемкость и материальные затраты.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлся спек пыли электродуговых печей с известняком, который получали для перевода цинка в лег-

корастворимую форму CaO·ZnO. Исходный материал измельчали на истирателе вибрационном лабораторном ИВС-4 до порошка с размером частиц ~0,04 мм и выходом ~97% состава, %: 11,9 Zn; 28,5 Ca; 16,6 Fe; 0,38 Mg; 0,14 Pb; < 0,05 Cl. Фазовый и гранулометрический составы измельченного Zn-содержащего материала приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Фазовый состав измельченного Zn-содержащего материала (данные рентгенофазового анализа (РФА))

Table 1. Phase composition of the crushed Zn-containing material (X-ray phase analysis data)

Химическая формула	Объемная доля фазы, %	Плотность, г/см ³
Ca ₂ Fe ₂ O ₅	49	4,04
CaO	32	3,37
ZnO	9	5,61
Na ₂ O ₂	9	2,80
TeO ₂	1	5,67
SiO ₂	< 0,01	2,65

Таблица 2. Гранулометрический состав измельченного Zn-содержащего материала

Table 2. Granulometric composition of the crushed Zn-containing material

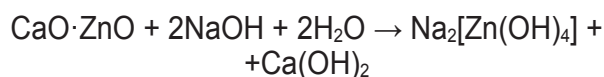
Крупность частиц	Содержание, %
Более 100 мкм (+0,1 мм)	3,01
От 71 до 100 мкм (– 0,1 + 0,071 мм)	3,04
От 40 до 71 мкм (– 0,071 + 0,040 мм)	15,75
Менее 40 мкм (–0,040 мм)	78,20

Для проведения экспериментов по выщелачиванию цинка использовали фракцию –0,1 мм, для которой по методике И 9106-13-2021 определили:

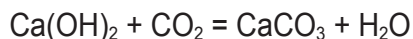
– плотность (истинная плотность, удельный вес) – 3,676 г/см³ (расчетная ориентировочная плотность по данным РФА – 3,872 г/см³);

– насыпная плотность (насыпной вес, объемный вес) – 1,371 г/см³.

Опыты по выщелачиванию спека едким натром проводили при перемешивании пульпы в следующих диапазонах исследованных параметров процесса: 50 г масса навески спека; 5–9 моль/дм³ NaOH; Ж:Т = 9:1; 70–90°C температура; 0,5–2,5 ч продолжительность. В результате цинк из состава спека переходил в раствор в виде тетрагидроксоцинката натрия, а кальций в основном оставался в малорастворимом остатке гидроксида:



Гидроксид кальция вступает во взаимодействие с углекислым газом и образует нерастворимый карбонат кальция и воду:



Элементный состав исходных пылей электродуговых печей и их спека с известняком определяли спектральным атомно-эмиссионным способом с использованием различных источников возбуждения спектра: индуктивно-связанная плазма на оптико-эмиссионном приборе «Spectroblue» (Spectro Analytical Instruments GmbH, Германия); искровой спектрометр «Spectrolab M12» (Spectro Analytical Instruments GmbH, Германия). Фазовый состав пылей и спека изучали на рентгенофазовом дифрактометре «Bruker D8 Advance» (Bruker AXS, Германия), оборудованном позиционно-чувствительным детектором «LynxEye» при следующих параметрах: углы дифракции $2\theta = 15\text{--}80^\circ$ с шагом $0,025^\circ$ за 1860 с; излучение K_αCo ; продолжительность 7,5 ч; использование пакета «Bruker DiffracSuite EVA v6.0» и баз данных «ICDD PDF-2 (v. 2019)», а также «Crystallography Open Database».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При гетерогенном растворении твердой фазы в жидкой взаимодействии включает внешне- и внутридиффузионный переносы исходных реагентов и продуктов реакции через жидкие и твердые слои, соответственно, на границе раздела фаз «жидкое–твердое»; собственно химическая реакция выщелачиваемого компонента с растворителем⁵.

Предварительными опытами были установлены минимальные значения параметров выщелачивания цинка, ниже которых существует исключительно внешедиффузионная область малоконцентрированных (разбавленных) систем, не позволяющая проводить кинетические исследования: концентрация $\text{NaOH} \geq 2$ моль/дм³, скорость перемешивания пульпы ≥ 10 рад·с⁻¹, температура ≥ 298 К, отношение $\text{Ж:Т} \geq 3$.

При проведении исследований использовали «метод начальных скоростей»⁵, позволяющий на первом этапе процесса раство-

рения нивелировать уменьшение суммарной поверхности дисперсной фазы в пульпе, увеличение плотности твердой оболочки продуктов реакции по мере их образования при относительном избытке реагента-растворителя⁶ [24, 25].

Универсальным показателем процесса растворения целевого компонента является степень его выщелачивания (α):

$$\alpha = G_t / G_o,$$

где G_t , G_o – количество цинка в растворе в момент времени (t) и в исходной твердой фазе ($t = 0$) соответственно.

Внешнедиффузионный режим процесса перевода в раствор, в нашем случае цинка, характеризуется следующими уравнениями:

$$\omega_c = d\alpha/dt = K_c \cdot S \cdot C_o^n;$$

$$\omega_v = d\alpha/dt = K_v \cdot S \cdot V^p;$$

$$\omega_T = d\alpha/dt = K_T \cdot S \cdot T^q,$$

где скорость перехода цинка в раствор ($\omega_{c, v, T}$, с⁻¹) при продолжительности (t , с) в зависимости от концентрации растворителя (C_o , моль/дм³), скорости перемешивания пульпы (V , рад·с⁻¹), температуры (T , К); константа скорости реакции ($K_{c, v, T}$) при изменении соответствующего параметра; поверхность дисперсной фазы (S , дм²); порядок реакции по концентрации растворителя (n_c); кажущиеся «порядки реакции» (p_v , q_T).

Значения n_c , p_v , q_T определяют по уравнениям:

$$n_c = \Delta \lg \omega / \Delta \lg C_{o(v, T)};$$

$$p_v = \Delta \lg \omega / \Delta \lg V;$$

$$q_T = \Delta \lg \omega / \Delta \lg T.$$

Продолжительность выщелачивания 50% цинка ($t_{0,5}$, с):

$$t_{0,5} = 0,23 \, r \alpha \delta / D \cdot C,$$

где радиус твердых частиц (r , дм); константа распределения ($\alpha = N/n$), мольная доля растворителя в твердой фазе (N), мольная доля выщелачиваемого цинка из твердой фазы (n); толщина диффузной пленки (δ , дм); коэффициент взаимодиффузии в растворе (D , дм²/г-ион·с); концентрация выщелачиваемого иона цинка в пульпе (C , г-ион/дм³).

⁵Мальцев Г.И. Комплексное извлечение попутных элементов из сырья металлургических предприятий Урала: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.02. Екатеринбург, 2011. С. 132, 133.

⁶Зеликман А.Н., Вольдман Г.М., Беляевская Л.В. Теория гидрометаллургических процессов: учеб. пособие. М.: Металлургия, 1983. 424 с.

Таблица 3. Показатели процесса обработки спека гидроксидом натрия
Table 3. Indicators of cake treatment with sodium hydroxide

NaOH, моль/дм ³	dα/dt, с ⁻¹	S, дм ²	n _c	C _o ⁿ	K _c , дм/моль·с
5	1,125·10 ⁻³	547,1	1,47	10,72	1,48·10 ⁻⁷
7	1,308·10 ⁻³			17,61	
9	1,45·10 ⁻³			25,50	

Таблица 4. Показатели щелочной переработки спека при различной скорости перемешивания пульпы
Table 4. Indicators of cake alkaline treatment under different pulp mixing rates

V, рад/с	dα/dt, с ⁻¹	S, дм ²	ρ _v	V ^p	K _v , 1/рад·дм ²
10	0,967·10 ⁻³	547,1	1,218	16,52	8,78·10 ⁻⁸
15	1,158·10 ⁻³			27,07	
20	1,45·10 ⁻³			38,43	

Таблица 5. Показатели выщелачивания цинка при различной температуре пульпы
Table 5. Zinc leaching rates at different pulp temperatures

T, К	dα/dt, с ⁻¹ *)	q _T	D, дм ² /(г-ион)·с	K _T , 1/дм ² ·К·с	D _o	E _a , кДж/моль
333	1,0·10 ⁻³	0,749	3,8·10 ⁻¹²	1,59·10 ⁻⁷	1,12·10 ⁻⁸	12,44
343	1,15·10 ⁻³		4,37·10 ⁻¹²			
353	1,28·10 ⁻³		4,876·10 ⁻¹²			
363	1,45·10 ⁻³		5,511·10 ⁻¹²			

*) – для начального участка кинетических кривых (α ≤ 0,3).

Скорость выщелачивания 50% цинка (ω_{0,5}, с⁻¹):

$$\omega_{0,5} = 0,5/t_{0,5}$$

Коэффициент взаимодиффузии в растворе (D):

$$D = (d\alpha/dt) \cdot \delta / C \cdot S;$$

$$D = D_0 e^{-E/kT},$$

где предэкспоненциальный множитель (D₀, дм²/г-ион·с); энергия активации (E, Дж); постоянная Больцмана (k).

$$E = 2,3RT_1T_2 \cdot \log(D_2/D_1) / (T_2 - T_1), \text{ Дж/моль}$$

$$E = 2,3Rt \cdot \text{tg}\gamma,$$

где тангенс угла наклона зависимости в координатах «logD–1/T»

$$[\text{tg}\gamma = \log(D_2/D_1)/(1/T_1 - 1/T_2)].$$

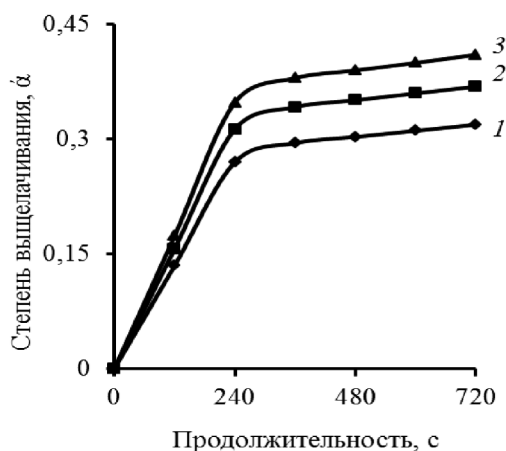


Рис. 1. Кинетические кривые выщелачивания цинка едким натром. NaOH, моль/дм³: 5 (1); 7 (2); 9 (3).
V = 20 рад·с⁻¹; T = 363 К

Fig. 1. Kinetic curves of zinc leaching with caustic soda. NaOH, mol/dm³: 5 (1); 7 (2); 9 (3). V = 20 rad·s⁻¹; T = 363 K

Изучение скорости перехода цинка в раствор ω_c, ω_v, ω_T от соответствующего параметра проводили при постоянных величинах двух других параметров, превышающих ранее выявленные минимальные значения (NaOH ≥ 2 моль/дм³, V ≥ 10 рад·с⁻¹, T ≥ 298 К).

Показатели процесса переработки спека гидроксидом натрия различной концентрации представлены в табл. 3 и на рис. 1, 2.

Показатели процесса щелочной переработки спека при различной скорости перемешивания пульпы представлены в табл. 4 и на рис. 3, 4.

Показатели процесса выщелачивания цинка из спека при различной температуре пульпы представлены в табл. 5 и на рис. 5, 6. На рис. 1–6 и в табл. 3–5 приведены результаты выщелачивания цинка, когда скорость перехода цинка в

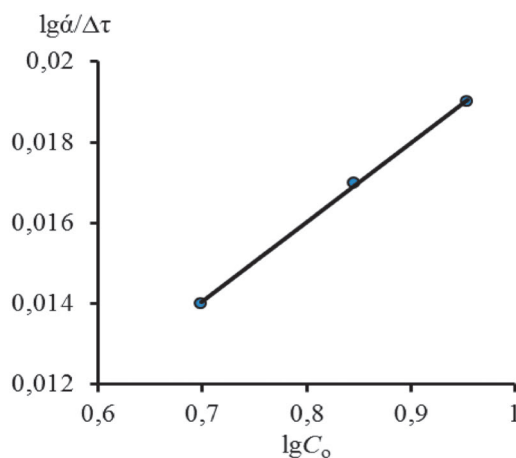


Рис. 2. Зависимость скорости выщелачивания цинка (lg α/Δτ) от концентрации щелочи (Co). V = 20 рад·с⁻¹; T = 363 К

Fig. 2. Zinc leaching rate (lg α/Δτ) vs alkali concentration (Co). V = 20 rad·s⁻¹; T = 363 K

раствор определяется внешнедиффузионным режимом. Кривые выщелачивания (рис. 1, 3, 5) свидетельствуют о том, что общая скорость процесса возрастает в пределах $(1,0-1,45) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, но в неодинаковой степени, когда повышаются концентрация растворителя, скорость перемешивания и температура пульпы. При увеличении продолжительности выщелачивания установлено снижение скорости перехода цинка в раствор цинка, что, вероятно, объясняется возникновением заметного диффузионного сопро-

тивления при преодолении исходными реагентами и продуктами реакции поверхностного слоя на границе раздела фаз «жидкость-твердое» в исследуемой системе⁵. В частности, при повышении концентрации щелочи с 5 до 9 моль/дм³, скорости перемешивания пульпы с 10 до 20 рад·с⁻¹, температуры системы с 333 до 363 К значения скорости выщелачивания цинка возрастают на 20–40%: $\omega_c = (1,125-1,45) \cdot 10^{-3}$, $\omega_v = (0,967-1,45) \cdot 10^{-3}$, $\omega_T = (1,0-1,45) \cdot 10^{-3}$ и практически одинаково влияют на скорость процесса.

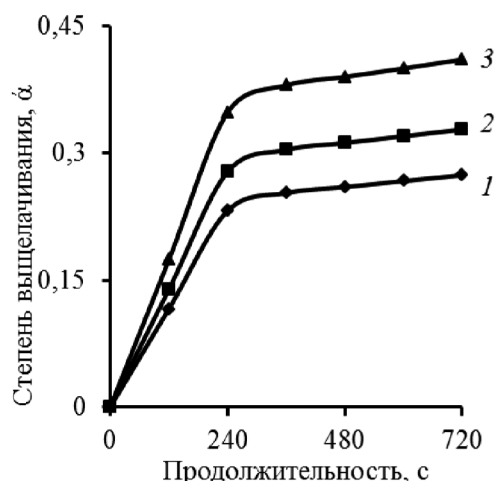


Рис. 3. Кинетические кривые выщелачивания цинка из спека при различной скорости перемешивания пульпы. V , рад·с⁻¹: 10 (1); 15 (2); 20 (3). 9 моль/дм³ NaOH; $T = 363 \text{ K}$

Fig. 3. Kinetic curves of zinc leaching from cake at different pulp mixing rates. V , рад·с⁻¹: 10 (1); 15 (2); 20 (3). 9 mol/dm³ NaOH; $T = 363 \text{ K}$

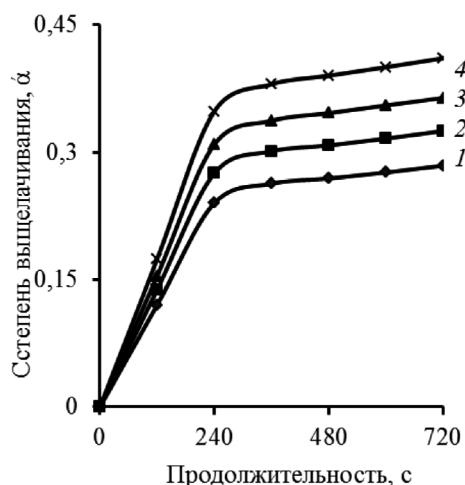


Рис. 5. Кинетические кривые выщелачивания цинка из спека при различной температуре пульпы, K : 333 (1); 343 (2); 353 (3); 363 (4). 9 моль/дм³ NaOH; $V = 20 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$

Fig. 5. Kinetic curves of zinc leaching from cake at different pulp temperatures, K : 333 (1); 343 (2); 353 (3); 363 (4). 9 mol/dm³ NaOH; $V = 20 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$

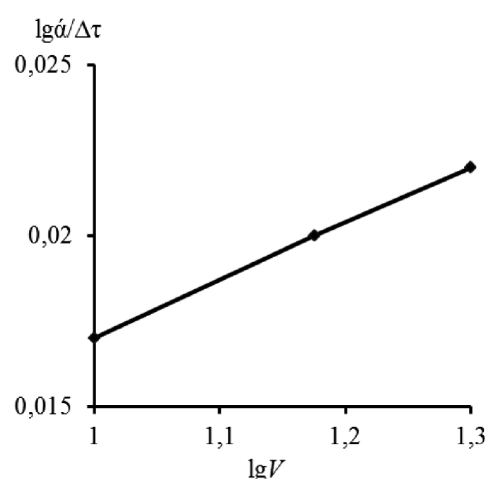


Рис. 4. Зависимость скорости выщелачивания цинка ($\lg \alpha / \Delta \tau$) от интенсивности перемешивания пульпы ($\lg V$). 9 моль/дм³ NaOH; $T = 363 \text{ K}$

Fig. 4. Zinc leaching rate ($\lg \alpha / \Delta \tau$) vs pulp mixing intensity ($\lg V$). 9 mol/dm³ NaOH; $T = 363 \text{ K}$

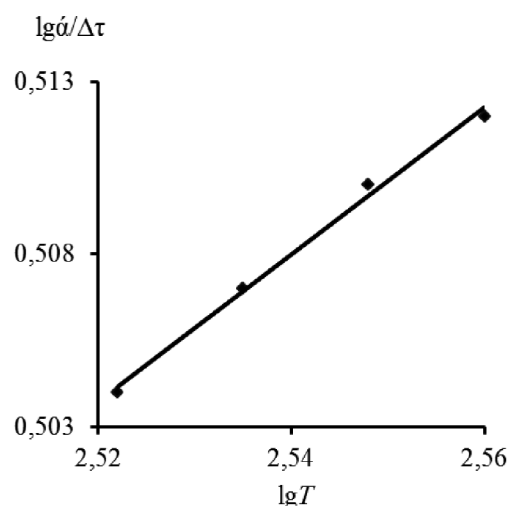


Рис. 6. Зависимость скорости выщелачивания цинка ($\lg \alpha / \Delta \tau$) от температуры пульпы ($\lg T$). 9 моль/дм³ NaOH; $V = 20 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$

Fig. 6. Zinc leaching rate ($\lg \alpha / \Delta \tau$) vs pulp temperature ($\lg T$). 9 mol/dm³ NaOH; $V = 20 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$

Согласно данным, представленным на рис. 2, 4, 6, показатели процесса выщелачивания цинка $n_c = 1,470$; $p_v = 1,218$; $q_T = 0,749$ являются постоянными величинами.

Константа скорости выщелачивания цинка от температуры $K_T = 1,59 \cdot 10^{-7}$ по абсолютной величине соизмерима с константой скорости $K_c = 1,48 \cdot 10^{-7}$ и практически в 2 раза выше, чем $K_v = 0,878 \cdot 10^{-7}$, полученных в сопоставимых условиях.

Из опытных данных, представленных в табл. 5, в интервале температур 333–363 К определили значение энергии активации $E = 12,44$ кДж/моль (4,1–4,5 кТ), которая превышает энергию теплового движения молекул ($E = 1–1,5$ кТ), но типична для внешне-диффузионного режима процесса выщелачивания цинка в исследуемой системе. Графическим способом в координатах «lgD – 1/T» определили $D_0 = 1,12 \cdot 10^{-8}$ дм²/(г-ион)с и $\lg a = 0,6429 \cdot 10^{-3}$, К⁻¹ (рис. 7).

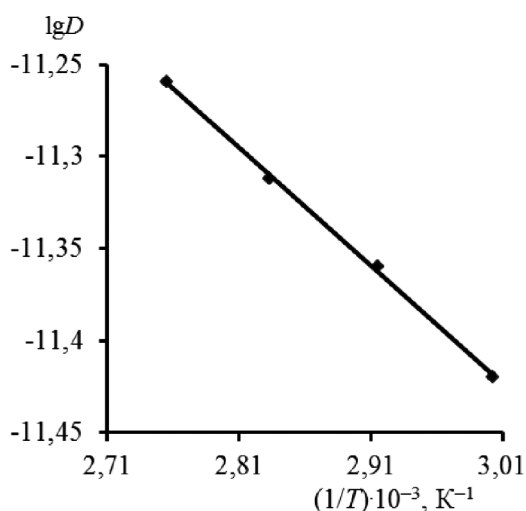


Рис. 7. Зависимость показателя lgD от 1/T при выщелачивании цинка из спека по внешнедиффузионному режиму. $\lg a = 0,6429 \cdot 10^{-3}$, К⁻¹; $E = 1,244 \cdot 10^4$ Дж/моль; $D_0 = 1,12 \cdot 10^{-8}$ дм²/(г-ион)с

Fig. 7. lgD indicator vs 1/T under zinc leaching from cake by an external diffusion mechanism. $\lg a = 0,6429 \cdot 10^{-3}$, К⁻¹; $E = 1,244 \cdot 10^4$ J/mol; $D_0 = 1,12 \cdot 10^{-8}$ dm²/(g-ion)s

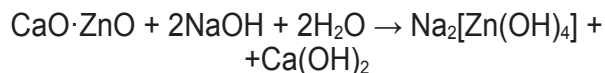
Увеличение значений скорости выщелачивания (da/dt) с $1,0 \cdot 10^{-3}$ до $1,45 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹ и коэффициента диффузии (D) с $3,8 \cdot 10^{-12}$ до $5,51 \cdot 10^{-12}$ дм²/(г-ион)с, снижение времени 50% извлечения цинка в раствор ($\tau_{0,5}$) с 2416 до 1663 с в интервале температур пульпы 333–363 К при небольшом энергетическом барьере $E = 12,44$ кДж/моль, вероятно, объясняется следующими факторами: во-первых, при возрастании температуры и дополнительном усилении разупоряд-

очивания структуры поверхностного жидкого слоя на частицах дисперсной фазы, затрудняющего взаимную диффузию растворителя и выщелачиваемого элемента; во-вторых, деструктируется твердый слой образующихся малорастворимых побочных продуктов реакции (гидроксидов металлов-примесей, карбоната кальция), который также затрудняет диффузионные переносы в исследуемой системе. Очевидно, имеются и другие причины увеличения значений da/dt и D с ростом температуры системы.

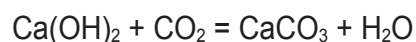
Итак, исследованный режим выщелачивания цинка едким натром из спека известняка с пылями электродуговых печей в данных пределах концентрации щелочи, скорости перемешивания пульпы и температуры относятся преимущественно к внешне-диффузионному переносу исходных реагентов и продуктов реакции через жидкий поверхностный слой на частицах дисперсной фазы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыты по выщелачиванию цинка раствором едкого натра из спека пыли электродуговых печей с известняком, полученного для перевода цинка в легкорастворимую форму CaO·ZnO, проводили при перемешивании пульпы в следующих диапазонах исследованных параметров процесса: масса навески спека $m = 50$ г; исходная концентрация цинка в пульпе $C_0 = 0,202$ г-ион/дм³; концентрация щелочи 5–9 моль/дм³ NaOH; Ж:Т = 9:1; скорость перемешивания пульпы $V = 10–20$ рад·с⁻¹; температура $T = 333–363$ К; продолжительность $\tau = 0,5–2,5$ ч. В результате цинк из спека переходил в раствор в виде тетрагидроксоцинката натрия, а кальций в основном оставался в малорастворимом остатке гидроксида:



Гидроксид кальция вступает во взаимодействие с углекислым газом, при этом образуются нерастворимый карбонат кальция и вода:



Исследованный режим выщелачивания цинка из спека известняка с пылями электродуговых печей в данных пределах концентрации щелочи, скорости перемешивания пульпы и температуры относится преимущественно к внешнедиффузионной области с величиной энергии активации E равной 12,44 кДж/моль.

Список источников

1. Растяникова Е.В. Вторичное использование ресурсов в металлургической промышленности в России и Китае // Инновации и инвестиции. 2019. № 7. С. 81–85. EDN: XNRAZG.
2. Казанбаев Л.А., Козлов П.А., Кубасов В.Л., Колесников А.В. Гидрометаллургия цинка. Очистка растворов и электролиз. М.: Руда и Металлы, 2006. 176 с.
3. Cardoso D., Narcy A., Durosoy S., Chevalier Y. The pH dependence of dissolution kinetics of zinc oxide // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2022. Vol. 650. P. 129653. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129653>.
4. Cardoso D., Narcy A., Durosoy S., Bordes C., Chevalier Y. Dissolution kinetics of zinc oxide and its relationship with physicochemical characteristics // Powder Technology. 2021. Vol. 378. Part B. P. 746–759. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.10.049>.
5. Huang Yukun, Duan Zhuo, Bai Ningning, Wang Huijuan, Cao Yijun, Song Xiangyu, Peng Weijun, et al. Highly selective dissolution and synchronous extraction of zinc from zinc-cobalt slag by an ionic liquid [Hbet][Tf₂N]–H₂O system: a novel method for separating zinc and cobalt // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 315. P. 128301. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128301>.
6. Kromm V., Hanreich A., Romeo A. 23. Dissolution kinetics of zinc, copper, and manganese sources in rumen fluid // Animal – science proceedings. 2022. Vol. 13. Iss. 1. P. 14–15. <https://doi.org/10.1016/j.ansci.2022.03.024>.
7. Al-Harashsheh M., Altarawneh S., Al-Omari M. Selective dissolution of zinc and lead from electric arc furnace dust via oxidative thermolysis with polyvinyl chloride and water-leaching process // Hydrometallurgy. 2022. Vol. 212. P. 105898. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105898>.
8. Wu Hangmi, Li Jiangling, Teng Wenxin, Chen Yangfan, Liu Weizao, Ren Shan, et al. One-step extraction of zinc and separation of iron from hazardous electric arc furnace dust via sulphating roasting-water leaching // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023. Vol. 11. Iss. 6. P. 111155. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111155>.
9. Ye Fu, Li Minting, Su Song, Xia Haitao, Wei Chang, Li Xingbin, et al. Separation and recovery of zinc from blast furnace dust via coordination leaching of Cl⁻ and hydrolysis of NH₄⁺ // Separation and Purification Technology. 2024. Vol. 330. Part B. P. 125361. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125361>.
10. Luo Xingguo, Wang Chenyu, Shi Xianguo, Li Xingbin, Wei Chang, Minting Li, et al. Selective separation of zinc and iron/carbon from blast furnace dust via a hydrometallurgical cooperative leaching method // Waste Management. 2022. Vol. 139. P. 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.007>.
11. Yang Xue, Xiaoming Liu, Na Zhang, Song Guo, Zhiqing Xie, Chunbao Xu. A novel process for the treatment of steelmaking converter dust: Selective leaching and recovery of zinc sulfate and synthesis of iron oxides@HTCC photocatalysts by carbonizing carbohydrates // Hydrometallurgy. 2023. Vol. 217. P. 106039. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106039>.
12. Xin Chunfu, Xia Hongying, Jiang Guiyu, Zhang Qi, Zhang Libo, Xu Yingjie, et al. Mechanism and kinetics study on ultrasonic combined with oxygen enhanced leaching of zinc and germanium from germanium-containing slag dust // Separation and Purification Technology. 2022. Vol. 302. P. 122167. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122167>.
13. Ding Wei, Bao Shenxu, Zhang Yimin, Xiao Junhui. Mechanism and kinetics study on ultrasound assisted leaching of gallium and zinc from corundum flue dust // Minerals Engineering. 2022. Vol. 183. P. 107624. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107624>.
14. Zhang Limin, Wang Yunyan, Ke Yong, Sun Zhumei, Li Yun, Peng Cong, et al. Facile and complete sulfuric acid leaching of zinc ferrite assisted by copper powder: leaching mechanism and kinetics investigation // Separation and Purification Technology. 2024. Vol. 328. P. 125090. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125090>.
15. Wang Xin, Zhong Yiwei, Kang Yuzheng, Gao Jintao, Guo Zhancheng. Promoted acid leaching of Zn from hazardous zinc-containing metallurgical dusts: focusing on transformation of Zn phases in selective reduction roasting // Process Safety and Environmental Protection. 2022. Vol. 163. P. 353–361. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.046>.
16. Xin Chunfu, Xia Hongying, Zhang Qi, Zhang Libo, Zhang Wei. Leaching of zinc and germanium from zinc oxide dust in sulfuric acid-ozone media // Arabian Journal of Chemistry. 2021. Vol. 14. Iss. 12. P. 103450. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103450>.
17. Lijuan Jia, Zhong Yingying, Li Kai, Li Bin, Gao Jiyun, Liu Tiancheng, et al. Recovery of zinc resources from secondary zinc oxide via composite ammonia leaching: analysis of Zn leaching behavior // Chemical Engineering Journal. 2023. Vol. 472. P. 144930. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144930>.
18. Khodaei H., Haghsheenas D.F., Firoozi S. Selective leaching of zinc from carbonate source using glycine as an ecofriendly lixiviant // Minerals Engineering. 2022. Vol. 185. P. 107680. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107680>.
19. Fan Yangyang, Liu Yan, Niu Liping, Zhang Weiguang, Zhang Zimu. Reductive leaching of indium from zinc-leached residue using galena as reductant // Minerals Engineering. 2021. Vol. 163. P. 106777. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106777>.
20. Zhang Tianfu, Liu Wei, Han Junwei, Wu Guiting, Jiao Fen, Qin Wenqing. Selective separation of calcium from zinc-rich neutralization sludge by sulfidation roasting and HCl leaching // Separation and Purification Technology. 2021. Vol. 259. P. 118064. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118064>.
21. Roshanfar M., Khanlarian M., Rashchi F., Motesharezadeh B. Phyto-extraction of zinc, lead, nickel, and cadmium from a zinc leach residue // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 266. P. 121539. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121539>.

22. Zhou Siyu, Liao Xiaojian, Li Shoupeng, Fang Xiaodi, Guan Zhijie, Ye Maoyou, et al. A designed moderately thermophilic consortia with a better performance for leaching high grade fine lead-zinc sulfide ore // *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 303. P. 114192. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114192>.
23. Li Changbin, Zhang Guofan, Zheng Hong, Zhang Feng, Liu Kun. Study on glass-ceramic prepared by zinc leaching residue and solidification mechanism of heavy metals // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 426. P. 139021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.39021>.
24. Касымова А.С., Абишева З.С., Жумартбаев Э.У., Пономарева Е.И. Кинетика выщелачивания галлия серной кислотой из фосфорсодержащего продукта // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 1990. № 6. С. 72–75.
25. Чиркст Д.Э., Черемисина О.В., Чистяков А.А., Балян Г.А. Кинетика выщелачивания цинка из шлака свинцово-медного производства // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2006. Т. 49. № 10. С. 35–38. EDN: HVODQD.

References

1. Rastiannikova E.V. Resource recycling in metallurgical industry of Russia and China. *Innovatsii i investitsii*. 2019;7: 81–85. (In Russ.). EDN: XNRAZG.
2. Kazanbaev L.A., Kozlov P.A., Kubasov V.L., Kolesnikov A.V. *Hydrometallurgy of zinc. Solution purification and electrolysis*. Moscow: Ruda i Metally; 2006, 176 p. (In Russ.).
3. Cardoso D., Narcy A., Durosoy S., Chevalier Y. The pH dependence of dissolution kinetics of zinc oxide. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022; 650:129653. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129653>.
4. Cardoso D., Narcy A., Durosoy S., Bordes C., Chevalier Y. Dissolution kinetics of zinc oxide and its relationship with physicochemical characteristics. *Powder Technology*. 2021;378(B):746-759. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.10.049>.
5. Huang Yukun, Duan Zhuo, Bai Ningning, Wang Huijuan, Cao Yijun, Song Xiangyu, Peng Weijun, et al. Highly selective dissolution and synchronous extraction of zinc from zinc-cobalt slag by an ionic liquid [Hbet][Tf₂N]–H₂O system: a novel method for separating zinc and cobalt. *Journal of Cleaner Production*. 2021;315:128301. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128301>.
6. Kromm V., Hanreich A., Romeo A. 23. Dissolution kinetics of zinc, copper, and manganese sources in rumen fluid. *Animal – science proceedings*. 2022;13(1):14-15. <https://doi.org/10.1016/j.anscip.2022.03.024>.
7. Al-Harashsheh M., Altarawneh S., Al-Omari M. Selective dissolution of zinc and lead from electric arc furnace dust via oxidative thermolysis with polyvinyl chloride and water-leaching process. *Hydrometallurgy*. 2022;212:105898. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105898>.
8. Wu Hangmi, Li Jiangling, Teng Wenxin, Chen Yangfan, Liu Weizao, Ren Shan, et al. One-step extraction of zinc and separation of iron from hazardous electric arc furnace dust via sulphating roasting-water leaching. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023;11(6):111155. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111155>.
9. Ye Fu, Li Minting, Su Song, Xia Haitao, Wei Chang, Li Xingbin, et al. Separation and recovery of zinc from blast furnace dust via coordination leaching of Cl[–] and hydrolysis of NH₄⁺. *Separation and Purification Technology*. 2024;330(B):125361. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125361>.
10. Luo Xingguo, Wang Chenyu, Shi Xianguo, Li Xingbin, Wei Chang, Minting Li, et al. Selective separation of zinc and iron/carbon from blast furnace dust via a hydrometallurgical cooperative leaching method. *Waste Management*. 2022;139:116-123. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.007>.
11. Yang Xue, Xiaoming Liu, Na Zhang, Song Guo, Zhiqing Xie, Chunbao Xu. A novel process for the treatment of steelmaking converter dust: Selective leaching and recovery of zinc sulfate and synthesis of iron oxides@HTCC photocatalysts by carbonizing carbohydrates. *Hydrometallurgy*. 2023;217:106039. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106039>.
12. Xin Chunfu, Xia Hongying, Jiang Guiyu, Zhang Qi, Zhang Libo, Xu Yingjie, et al. Mechanism and kinetics study on ultrasonic combined with oxygen enhanced leaching of zinc and germanium from germanium-containing slag dust. *Separation and Purification Technology*. 2022;302:122167. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122167>.
13. Ding Wei, Bao Shenxu, Zhang Yimin, Xiao Junhui. Mechanism and kinetics study on ultrasound assisted leaching of gallium and zinc from corundum flue dust. *Minerals Engineering*. 2022;183:107624. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107624>.
14. Zhang Limin, Wang Yunyan, Ke Yong, Sun Zhumei, Li Yun, Peng Cong, et al. Facile and complete sulfuric acid leaching of zinc ferrite assisted by copper powder: leaching mechanism and kinetics investigation. *Separation and Purification Technology*. 2024;328:125090. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125090>.
15. Wang Xin, Zhong Yiwei, Kang Yuzheng, Gao Jintao, Guo Zhancheng. Promoted acid leaching of Zn from hazardous zinc-containing metallurgical dusts: focusing on transformation of Zn phases in selective reduction roasting. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022;163:353-361. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.046>.
16. Xin Chunfu, Xia Hongying, Zhang Qi, Zhang Libo, Zhang Wei. Leaching of zinc and germanium from zinc oxide dust in sulfuric acid-ozone media. *Arabian Journal of Chemistry*. 2021;14(12):103450. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103450>.
17. Lijuan Jia, Zhong Yingying, Li Kai, Li Bin, Gao Jiayun, Liu Tiancheng, et al. Recovery of zinc resources from secondary zinc oxide via composite ammonia leaching: analysis of Zn leaching behavior. *Chemical Engineering Journal*. 2023;472:144930. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144930>.
18. Khodaei H., Haghsheenas D.F., Firoozi S. Selective leaching of zinc from carbonate source using glycine as an ecofriendly lixiviant. *Minerals Engineering*. 2022;185:107680. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107680>.

19. Fan Yangyang, Liu Yan, Niu Liping, Zhang Weiguang, Zhang Zimu. Reductive leaching of indium from zinc-leached residue using galena as reductant. *Minerals Engineering*. 2021;163:106777. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106777>.
20. Zhang Tianfu, Liu Wei, Han Junwei, Wu Guiting, Jiao Fen, Qin Wenqing. Selective separation of calcium from zinc-rich neutralization sludge by sulfidation roasting and HCl leaching. *Separation and Purification Technology*. 2021;259:118064. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118064>.
21. Roshanfar M., Khanlarian M., Rashchi F., Motesharezadeh B. Phyto-extraction of zinc, lead, nickel, and cadmium from a zinc leach residue. *Journal of Cleaner Production*. 2020;266:121539. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121539>.
22. Zhou Siyu, Liao Xiaojian, Li Shoupeng, Fang Xiaodi, Guan Zhijie, Ye Maoyou, et al. A designed moderately thermophilic consortia with a better performance for leaching high grade fine lead-zinc sulfide ore. *Journal of Environmental Management*. 2022;303:114192. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114192>.
23. Li Changbin, Zhang Guofan, Zheng Hong, Zhang Feng, Liu Kun. Study on glass-ceramic prepared by zinc leaching residue and solidification mechanism of heavy metals. *Journal of Cleaner Production*. 2023;426:139021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.39021>.
24. Kasymova A.S., Abisheva Z.S., Zhumartbaev E.U., Ponomareva E.I. Kinetics of gallium leaching with sulfuric acid from a phosphorus-containing product. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 1990;6:72-75. (In Russ.).
25. Chirkst D.E., Cheremisina O.V., Chistyakov A.A., Balyan G.A. Kinetics of lixiviation of Zn from slag of Pb-Cu production. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = ChemChemTech*. 2006;49(10):35-38. (In Russ.). EDN: HVODQD.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Якорнов Сергей Александрович,

к.т.н.,
первый заместитель технического директора,
ОАО «Уральская горно-металлургическая
компания»,
624091, г. Верхняя Пышма, пр. Успенский, 1, Россия
✉ info@uralmine.com

Мальцев Геннадий Иванович,

д.т.н., старший научный сотрудник,
главный специалист Исследовательского центра,
АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, пр. Успенский, 1, Россия
maltsewg@yandex.ru

Воинков Роман Сергеевич,

к.т.н.,
начальник Исследовательского центра,
АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, пр. Успенский, 1, Россия;
доцент кафедры металлургии,
Технический университет Уральской
горно-металлургической компании,
624091, г. Верхняя Пышма, пр. Успенский, 3, Россия
r.voinkov@uralcopper.com

Гребнева Анна Александровна,

к.х.н.,
ведущий инженер-технолог Исследовательского центра,
АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, пр. Успенский, 1, Россия
vs_finder@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey A. Yakornov,

Cand. Sci. (Eng.),
First Deputy Technical Director
Ural Mining & Metallurgical Company,
1 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma, 624091, Russia
✉ info@uralmine.com

Gennady I. Maltsev,

Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Chief Specialist of the Research Center,
JSC Uralelectromed,
1 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma, 624091, Russia
maltsewg@yandex.ru

Roman S. Voinkov,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Research Center,
JSC Uralelectromed,
1 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma, 624091, Russia
Associate Professor of the Metallurgy Department,
Technical University of the Ural Mining and Metallurgical
Company,
3 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma, 624091, Russia
r.voinkov@uralcopper.com

Anna A. Grebneva,

Cand. Sci. (Chem.),
Leading Engineer of the Research Center,
JSC Uralelectromed,
1 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma, 624091, Russia
vs_finder@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this 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 04.12.2023 г.; одобрена после рецензирования 29.12.2023 г.; принята к публикации 15.01.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 04.12.2023; approved after reviewing 29.12.2023; accepted for publication 15.01.2024.

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: pgr@istu.edu **в виде файла с расширением *.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с приложением файлов (**представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах**);
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

«iPolytech Journal» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, (Категория К-1) в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «Кибер-EBSCO, в Ленинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «iPolytech Journal», реферируются и рецензируются.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.

Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный секретарь.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: pgr@istu.edu

Редактор Я.В. Макшанцева
Дизайнер В.Г. Лисицин
Ответственный секретарь
Г.П. Привалова
Перевод на английский язык
Tomas A. Beavitt,
Н.Г. Поповой, В.В. Батицкой
Верстка Ю.В. Макаровой

Выход в свет 29.03.2024 г.
Формат 60x90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 25.
Тираж 500 экз. Номер по реестру 159 / 3н.

Издание распространяется **бесплатно**



iPolytech Journal

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