Polytech Journal Tom 29, Nº 1. 2025 / Vol. 29, No 1. 2025

Research Technica

K1151812

rkutsk Nationa,

Lechnical.

1115101

Research

Ithursk Nationa,

iPolytech Journal

Том 29, Nº 1. 2025 / Vol. 29, No. 1. 2025



Том 29, Nº 1. 2025 / Vol. 29, No. 1. 2025

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

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

Периодичность издания - ежеквартально. Языки – русский и английский.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор): Регистрационный номер: ПИ № ФС 77–82388 от 10 декабря 2021 г. (Ранее действовавшие Свидетельства: И № 0327 от 19 сентября 1997 г.; ПИ №77-13046 от 15 июля 2002 г.; ПИ № ФС77- 42847 от 26 ноября 2010 г., ПИ № ФС77-47902 от 22 декабря 2011 г.; ПИ № ФС77-62813 от 18 августа 2015 г.).

Учредитель и издатель:

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

Издательство:

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

Адрес редакции:

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

iPolytech Journal

Том 29, Nº 1. 2025 / Vol. 29, No.1. 2025

SCHOLARLY JOURNAL

"iPolytech Journal" is a quarterly academic journal publishing theoretical and applied research papers in mechanical engineering, energy and metallurgy. From 1997 to 2021 the journal was published under the title "Proceedings of Irkutsk State Technical University" ((Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta). Periodicity: Quarterly

Periodicity: Quarterly Articles are published in Russian and English.

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media: Registration certificate PI No FS77-82388 of 10 December 2021. (previously valid certificates: И No 0327 of September 19, 1997; ПИ No77-13046 of July 15, 2002; ПИ No ФС77-42847 of November 26, 2010, ПИ No ФС77-47902 of December 22, 2011; ПИ No ФС77-62813 of August 18, 2015).

Founder and Publisher:

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

Publishers:

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

Editorial office:

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

iPolytech Journal

Том 29, Nº 1. 2025 / Vol. 29, No. 1. 2025

Редакционная коллегия

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

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

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СЕНДЕРОВ С.М., д.т.н., заместитель директора Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (Иркутск, Россия) СТЕННИКОВ В.А., академик РАН, д.т.н., профессор, директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (Иркутск, Россия)

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

СУНЬ Хуапин, прфессор Цзянсуского университета (Чженьцзян, Китай)

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

СЮЭМЭЙ Чжен, профессор кафедры электротехники Харбинского технологического университета (Харбин, Китай) **ЛЮ Фанг**, профессор Центрального Южного Университета (Чанша, провинция Хунань, Китай)

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

ФИШОВ А.Г., д.т.н., профессор Новосибирского государственного технического университета (Новосибирск, Россия) ШОЛЬТЕС Бертхольт, директор Института металловедения Кассельского университета (Кассель, Германия)

iPolytech Journal

Том 29, Nº 1. 2025 / Vol. 29, No.1. 2025

Editorial Board

CHIEF EDITOR:

Denis N. SIDOROV, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Full Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

DEPUTIES OF CHIEF EDITOR:

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

Denis S. FEDOSOV, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Power Plants, Networks and Systems at Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief in Energy Sciences (Irkutsk, Russia)

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

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

Vladimir Yu. BAZHIN, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgy, Saint Petersburg Mining University named after the Empress Caterine II (Saint Petersburg, Russia)

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

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

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

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

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

Pavel V. ILYUSHIN, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Chief Researcher, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Head of the Center for Intelligent Electric Power Systems and Distributed Energy (Moscow, Russia)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Mohammad Mehdi RASHIDI, Professor Tongji University, (China)

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

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

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

Huaping SUN, Professor, Jiangsce University (Zheniang, China)

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

Xuemei ZHENG, Professor of the Department of Electrical Enngineering of Harbin University of Technology (Harbin, China) Fang LIU, Professor, Central Southern University (Changsha, Hunan Province, China)

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

Aleksander G. FISHOV, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia) Berholt SCHOLTES, Director, Institute of Metal Science, University of Kassel (Kassel, Germany)



Том 29, № 1. 2025 / Vol. 29, No. 1. 2025

Содержание

Машиностроение

Вулых Н.В., Пономарев Б.Б. Моделирование и расчёт напряженно-деформированного	
состояния микропрофиля при ортогональном воздействии в зависимости от условий	
нагружения	10
Ерзин О.А., Васин С.А., Клентак А.С. Анализ вариаций угловых координат режущего	
инструмента при изменении условий резания в процессе выполнения технологических	
операций	22

Энергетика

Белосветов А.В., Манусов В.З. Анализ влияния скин-эффекта на активное сопротивление в проводах линий электропередачи	33
Гиршин С.С., Горюнов В.Н., Петрова Е.В., Криволапов В.А., Деев В.А., Щербаков К.С.,	
Николаев М.Ю. Контроль температуры токопроводящей жилы защищённых проводов воздушных линий по значениям температуры на поверхности изоляции	51
Дао Минь Хиен, Во Ван Чыонг, Лю Фанг, Сидоров Д.Н. Подход на основе нейронных сетей	
Колмогорова-Арнольда к оценке состояния заряда и оценке интервала прогнозирования	
для литий-ионных аккумуляторов (на англ. яз.)	66
Кирпичникова И.М., Заварухин В.А., Серов В.А. Обнаружение потенциальных	
неисправностей фотоэлектрических модулей в реальных условиях эксплуатации по их	
вольт-амперным характеристикам	82
Крюков А.В., Середкин Д.А., Воронина Е.В. Учет гармонических искажений при	
моделировании электромагнитных полей в искусственных сооружениях железных	
дорог	96
Туманов И.Е. Конструирование и анализ мультифизической модели трёхфазного	
электромагнитного возбудителя низкочастотных колебаний с четырёхконтурным силовым	
модулем	107

Металлургия

Бывальцев	А.В.,	Войло	шников	Г.И.,	Хмельн	ицкая	0.Д.	Мето,	цика	подготовки	
углистосодер»	кащих	хвостое	з цианир	ования	к проби	рному а	анализу	/ 30/01	а (на	англ. яз.)	123
Шарипова У	/.Р., Т р	етьяк	M.A., K	аримов	в К.А.,	Рогожн	ников	Д.А.	Гидрот	гермальное	
взаимодейст	вие сфа	алерита	с раство	орами с	сульфата	меди в	присут	гствии	ЛИГНО	сульфоната	
натрия											133

iPolytech Journal

Том 29, № 1. 2025 / Vol. 29, No. 1. 2025

Content

Mechanical engineering

Vulykh N.V., Ponomarev B.B. Stress-strain state simulation and calculation of a microprofileunder orthogonal impact depending on loading conditions10Erzin O.A., Vasin S.A., Klentak A.S. Analysis of changes in angular coordinates of cutting22

Power engineering

Belosvetov A.V., Manusov V.Z. Skin effect and active resistance of power transmission line wires	33
Girshin S.S., Goryunov V.N., Petrova E.V., Krivolapov V.A., Deev V.A., Shcherbakov K.S.,	
Nikolayev M.Yu. Temperature control of aerial current-carrying conductors by insulation	51
Dao Minh Hien Vo Van Truong Liu Fang Sidorov D N A Kolmogorov-Arnold neural networks	5T
approach to state of charge estimation and confidence assessment for Li-ion batteries Kirpichnikova I.M., Zavarukhin V.A., Serov V.A. I-V curves for detecting faults of operating	66
photovoltaic modules	82
Kryukov A.V., Seredkin D.A., Voronina E.V. Consideration of harmonic distortions in electromagnetic simulation of artificial railroad structures	96
exciter of low-frequency oscillations with a four-circuit power module	107

Metallurgy

Byvaltsev	A.V.,	Voiloshnikov	G.I.,	Khmelnitskaya	O.D .	А	procedure	for	preparing	
carbonace	ous cya	anidation tailin	igs for	gold fire assay						123
Sharipova	U.R., T	retiak M.A., K	arimo	v K.A., Rogozhnil	ov D.A	\. ⊦	lydrotherma	al inte	eraction of	
sphalerite	with co	pper sulfate se	olutior	ns in the presence	of soc	diur	n lignosulfo	nate		133



Том 29, Nº 1. 2025 / Vol. 29, No. 1. 2025

Уважаемые читатели!

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

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

«iPolytech Journal» реферируется и рецензируется

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

• Машиностроение

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

Редколлегия

iPolytech Journal

Том 29, Nº 1. 2025 / Vol. 29, No.1. 2025

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

Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 10-21

2025;29(1):10-21

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья УДК 621.77.014 EDN: OUJGOC DOI: 10.21285/1814-3520-2025-1-10-21

Моделирование и расчёт напряженно-деформированного состояния микропрофиля при ортогональном воздействии в зависимости от условий нагружения

Н.В. Вулых^{1⊠}, Б.Б. Пономарев²

^{1.2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – установить механику формообразования и напряженное состояние микропрофиля на поверхностях деталей машин при воздействии, сопоставимом с начальной шероховатостью, в зависимости от условий нагружения. В расчетной модели микронеровностей применяли физико-механические характеристики мягкого материала, имитирующего медь. Разработана численная модель осадки микропрофиля на поверхностях деталей машин для различных условий нагружения. Установлено, что увеличение степени стеснения модели микронеровностей при переходе от свободной к стесненной схеме нагружения способствовало повышению: угла у основания деформированного микропрофиля с 35 до 58°, относительной длины сглаженного участка с 0,46 до 0,8, а также вертикального подъема точки впадин микропрофиля с 0,012 до 0,21. При высвобождении фиксации одной из пар боковых поверхностей микропрофиля ортогональная к ней деформировалась в большей степени относительно соответствующей поверхности при свободном закреплении. Максимальная вытяжка образца в направлении оси оХ составила 7%, в направлении оси оZ – 13%. Напряженное состояние под пиками микронеровностей при полной осадке, в зависимости от типа нагружения и расположения микровыступов, составляло от 1050 до 1370 МПа и превысило предел прочности образцов в 5-7 раз. Во впадинах напряженное состояние достигло максимального значения в 1190 МПа для жесткой схемы закрепления и превзошло остальные схемы закрепления в 4-12 раз, с превышением предела прочности образцов в 0,5-6 раз. Наименьшая однородность напряженного состояния по сечению микропрофиля была у образцов со свободным закреплением, наибольшая – у образцов с жестким закреплением. При схеме нагружения с жестким закреплением происходило наиболее качественное выглаживание микропрофиля с формированием более однородного напряженного состояния по сечению микропрофиля. Исследования полезны при назначении условий обработки заготовок локальными способами деформирования, при варьировании степени стесненного нагружения в пределах границ обрабатываемых поверхностей.

Ключевые слова: шероховатый слой поверхности, конечно-элементный анализ, стесненное деформирование деталей, напряженное состояние

Для цитирования: Вулых Н.В., Пономарев Б.Б. Моделирование и расчёт напряженно-деформированного состояния микропрофиля при ортогональном воздействии в зависимости от условий нагружения // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 1. С. 10–21. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-10-21. EDN: OUJGOC.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Stress-strain state simulation and calculation of a microprofile under orthogonal impact depending on loading conditions

Nikolay V. Vulykh¹, Boris B. Ponomarev²

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

Abstract. The present study aims to establish the effect of loading conditions on the shaping mechanics and stress-strain state of a surface microprofile for machine parts under the initial roughness impact. The used calculation model of microroughness includes physical and mechanical characteristics of a soft copper-simulating material. A numerical model of microsettlements on the surfaces of machine parts is developed for various loading conditions. The transition from free to restrained loading of the microroughness model increases the angle at the base of the deformed microprofile from 35 to 58°, relative length of the smoothed section from 0.46 to 0.8, and vertical rise of the microprofile depression point from 0.012 to 0.21. For one unfastened pair of side microprofile





Вулых Н.В., Пономарев Б.Б. Моделирование и расчёт напряженно-деформированного состояния микропрофиля...

Vulykh N.V., Ponomarev B.B. Stress-strain state simulation and calculation of a microprofile under orthogonal impact depending...

surfaces, orthogonal pair is deformed to a greater extent relative to the corresponding freely fastened surface. The maximum elongation of the sample in the direction of oX and oZ axes is 7 and 13%, respectively. Depending on loading conditions and location of microprotrusions, the full-settlement stress under the microroughness peaks ranges from 1050 to 1370 MPa exceeding the ultimate strength of the samples by 5-7 times. The stress of depressions on rigidly fastened samples reaches a maximum value of 1190 MPa, which exceeds the values for other fastening options and ultimate strength of the samples by 4-12 and 0.5-6 times, respectively. The lowest stress homogeneity across the microprofile cross-section has been found in freely fastened samples; rigidly fastened samples have the highest stress homogeneity. The optimal microprofile smoothing is typical for rigid fastening loading with a more uniform stress across the microprofile cross-section. The studies are relevant for assigning the conditions of workpiece processing using local deformation methods under the varying degree of restrained loading within the boundaries of the processed surfaces.

Keywords: rough surface layer, finite element analysis, constrained deformation of parts, stress state

For citation: Vulykh N.V., Ponomarev B.B. Stress-strain state simulation and calculation of a microprofile under orthogonal impact depending on loading conditions. *iPolytech Journal*. 2025;29(1):10-21. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-10-21. EDN: OUJGOC.

введение

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) часто применяют для формирования определенных свойств поверхностного слоя почти готовых деталей. Технологии ППД включают локальные способы воздействия (обкатка шариком, роликом, алмазное выглаживание и др.) [1-9]. При локальных ППД увеличение силового воздействия инструмента на заготовку приводит к возрастанию в ней напряженного состояния (НС) – качественной составляющей обработки (при алмазном выглаживании). Однако локализация контактного воздействия инструмента на заготовку приводит к снижению производительности процесса. Другой путь, считающийся современным [4, 10] и интенсифицирующий НС поверхностного слоя заготовки, заключается в применении методики стесненного деформирования [10-16]. При локальных методах ППД могут встречаться различные степени стесненного состояния, например, у границ поверхностей обрабатываемых заготовок, а также не контактирующих с инструментом поверхностей, степень стеснения (СС) будет минимальной, а в случае практической невозможности перемещения металла заготовки при деформировании СС будет приближаться к максимальной – для условия всестороннего сжатия. Деформационное воздействие индентора на микропрофиль происходит ортогонально. В работах [11, 17-22] показано, что для моделирования микропрофиля может быть применим регулярный треугольный микропрофиль, при этом контактирование инструмента происходит по ряду пиков шероховатости.

В статье решена задача по формоизменению микропрофиля заготовки при силовом воздействии на последнюю, с определением напряженно-деформированного состояния микровыступов для различных схем нагружения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценку напряженно-деформированного состояния микропрофиля [11, 18] выполнили с помощью программного модуля ANSYS Workbench [23].

Деформирование микропрофиля осуществляли по схеме (рис. 1), показывающей динамику деформации микровыступов [11, 17, 18].

Геометрические и механические параметры микропрофиля шириной b – 25 мм (см. рис. 1) и индентора представлены в работах [11, 18]. Материал микропрофиля является пластичным, применяемым для прокладок запорной арматуры с целью герметизации сосудов высокого давления [20, 24–28].

Величина подложки сравнима с высотой микронеровностей [18]. Условия деформирования: свободное, полустесненное двух типов и стесненное.

Условия процесса упругопластической осадки микропрофиля приведены в работах [11, 18].

На рис. 2 представлена конечно-элементная (КЭ) сетка образцов, имеющая сгущение на поверхности, в месте контакта с индентором. А также приведены характеристические точки микропрофиля вершин – а, b, с и впадин – d, e, f, служащих для расчета интенсивности напряжений².

Для различных видов нагружения образцов установлены следующие граничные условия (табл. 1, рис. 3).

²Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности: учеб. пособ. 2-е перераб изд. М.: Высшая школа, 1982. 264 с.

2025. T. 29. № 1. C. 10-21 2025;29(1):10-21

Polytech Journal



Рис. 1. Физическая модель нагружения микронеровностей жестким инструментом: 1 – индентор; 2 – бондаж; 3 – образец **Fig. 1.** Physical model of exposing microroughness to the rigid tool impact: 1 – indentor; 2 – device body; 3 – sample



Рис. 2. Конечно-элементная сетка образца (число КЭ – 4834, узлов – 23963) **Fig. 2.** Fnite-element grid of a sample (4,834 finite elements, 23,963 nodes)

Таблица 1. Характеристики фиксации образцов	6
Table 1. Fixing characteristics of samples	

Вид нагружения (фиксации) образца										
свободное закрепление	полусвободное закрепление № 1	полусвободное закрепление № 2	жесткое закрепление							
	Характер фиксации образца (рис. 3)									
основание образ- ца ограничивали в перемещении по оси оҮ	 основание образца ограничивали в перемещении по оси оҮ и оХ; перемещение по торцам образца ограничивали по оси оХ 	 основание образца ограничивали в перемещении по оси оУ и оZ; перемещение по боковым граням образца ограничивали по оси оZ 	 перемещение по торцам образца ограничивали по оси оХ (Displacement D, E); перемещение по боковым граням ограничивали у образца по оси оZ (Displacement B, C); основание образца полностью фиксировали (Fixed Support F) 							
	Тип нагружения (фиксации) образца (рис. 4)									
1	2	3	4							

Вулых Н.В., Пономарев Б.Б. Моделирование и расчёт напряженно-деформированного состояния микропрофиля... Vulykh N.V., Ponomarev B.B. Stress-strain state simulation and calculation of a microprofile under orthogonal impact depending...



Рис. 3. Характер закрепления и задания нагрузки на микронеровности **Fig. 3.** Nature of fixing and load setting on microroughness

Осадку микропрофиля осуществляли путем ортогонального перемещения индентора на половину исходной высоты микропрофиля h (Joint-Displacement), см. рис. 1, 3 [11, 17, 18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние типа нагружения (см. табл. 1) модели микронеровностей на относительную длину I_D сглаженного участка, вертикальное смещение I_h точки впадин микропрофиля и изменение угла α_d при основании деформированного микропрофиля [18] представлено на рис. 4, где $I_D = \frac{D_i}{D}$; $I_h = \frac{S_i}{h}$; $\cos \alpha_d = \frac{D_{2} - \frac{D_i}{2}}{k_i}$; $\varepsilon_h = 100\%$ при h = 6 мм (см. рис. 1, 5).

При максимальной осадке микропрофиля (см. рис. 4) увеличение степени стеснения





Fig. 4. Influence of the microroughness model loading type on the relative length of the smoothed section $I_D - 1$; valley vertical displacement $I_n - 2$; microprofile base angle $\alpha_d - 3$



Рис. 5. Схема формоизменения модели шероховатости: а – недеформированный профиль, b – профиль после i-го деформирования; D – длина единичного выступа микропрофиля, мм; D_i – длина сглаженного участка микропрофиля после i-го деформирования, мм; h – высота микропрофиля, мм; S_i – величина подъема впадины после i-го деформирования, мм; α_d – угол при основании деформированного микропрофиля, град

Fig. 5. Diagram of microroughness model form change: a - unstrained microprofile; b - microprofile after the i-th strain; D - length of a microprofile single protrusion, mm; $D_i -$ length of the microprofile smoothed section after the i-th strain, mm; h - microprofile height, mm; $S_i -$ valley elevation after the i-th strain, mm; $\alpha_d -$ angle at the strained microprofile base, deg.

ISSN 2782-4004 (print)

iPolytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 10-21 2025:29(1):10-21

ISSN 2782-6341 (online)

модели микронеровностей способствует повышению угла у основания деформированного микропрофиля, относительной длины сглаженного участка и вертикального подъема точки впадин микропрофиля. Это указывает на то, что чем больше стеснен микропрофиль, тем сильнее деформируются его микровыступы. Установлено, что ограничение бокового перемещения микропрофиля по оси оХ (тип нагружения 2) не привело к существенному изменению геометрии деформированного микропрофиля относительно свободной схемы закрепления (тип нагружения 1). Ограничение бокового перемещения микропрофиля по оси оZ (тип нагружения 3) способствовало значительному подъему точки впадины (с 0,012 до 0,12) и в меньшей степени – увеличению относительной длины сглаженного участка микропрофиля (с 0,46 до 0,6) и повышению угла у основания деформированного микропрофиля (с 35 до 39°). Жесткое закрепление микропрофиля (тип нагружения 4) привело к подъему точки впадины до 0,21, возрастанию относительной длины сглаженного участка микропрофиля до 0,8, и увеличению угла у основания деформированного микропрофиля до 58°.

На рис. 6 показаны половины изополос деформированного микропрофиля – для выступов 1, 2 и 3 (см. рис. 3) [5, 8]. Изополосы показаны для вертикального (оҮ) и горизонтальных (оХ) и (оZ) направлений деформирования микронеровностей до степени осадки (ɛ_h) равной 50%.



Рис. 6. Участки распределения пластических деформаций микропрофиля: a - направление oX, тип нагружения 1, $\varepsilon_h = 50\%$; b - направление oY, тип нагружения 3, $\varepsilon_h = 50\%$; d - направление oY, тип нагружения 3, $\varepsilon_h = 50\%$; d - направление oY, тип нагружения 3, $\varepsilon_h = 50\%$; e - направление oZ, тип нагружения 2, $\varepsilon_h = 50\%$; f - направление oZ, тип нагружения 1, $\varepsilon_h = 50\%$ **Fig. 6.** Distribution areas of microprofile plastic deformations: a - oX direction, loading type 1, $\varepsilon_h = 50\%$; b - oY direction, loading type 1, $\varepsilon_h = 50\%$; c - oZ direction, loading type 3, $\varepsilon_h = 50\%$; d - oY direction, loading type 3, $\varepsilon_h = 50\%$; d - oZ direction, loading type 2, $\varepsilon_h = 50\%$; f - oZ direction, loading type 1, $\varepsilon_h = 50\%$; f - oZ direction, loading type 1, $\varepsilon_h = 50\%$; f - oZ direction, loading type 1, $\varepsilon_h = 50\%$; f - oZ direction, loading type 1, $\varepsilon_h = 50\%$; f - oZ direction, loading type 1, $\varepsilon_h = 50\%$; f - oZ direction, loading type 1, $\varepsilon_h = 50\%$; f - oZ direction, loading type 1, $\varepsilon_h = 50\%$

Вулых Н.В., Пономарев Б.Б. Моделирование и расчёт напряженно-деформированного состояния микропрофиля... Vulykh N.V., Ponomarev B.B. Stress-strain state simulation and calculation of a microprofile under orthogonal impact depending...

Анализ изополос пластического формоизменения микровыступов в трех направлениях показал: для жесткого закрепления (тип нагружения 4 на рис. 6 не представлен, подобные изополосы рассмотрены в [11, 18]) площадь пустот осталась незначительной, при этом глубина пустот составила около 1,7 мм 28% от первоначальной высоты профиля. Для свободного закрепления (тип нагружения 1) подъем точки впадины практически не наблюдался, см. рис. 4 и 6 b, при этом глубина пустот составила около 2,9 мм – 48% от исходной высоты профиля, что явилось следствием вытягивания образца в направлении оси оХ и уширением в направлении оси оZ, см. рис. 6 a, f. Для остальных схем нагружения подъем точки впадины и глубина пустот микропрофиля имели промежуточное значение между жестким и свободным закреплением, см. рис. 4, 6. Раздача образцов в направлении оси оZ (см. рис. 6 е, f) имела следующий характер: раздача крайних пиков микропрофиля произошла в меньшей степени, чем у центральных (тип нагружения 1), что может быть следствием свободного течения металла в направлении оси оХ. При полусвободном закреплении (тип нагружения 2) пластическое течение металла имело симметричный характер, а также превышало соответствующую величину для свободной схемы закрепления.

Изменение граничных условий закрепления (высвобождение боковых сторон микропрофиля) внесло значительное изменение в характер деформирования.

В табл. 2 представлена величина вытяжки боковых сторон микропрофиля в направлении оси оХ и уширения боковых сторон микропрофиля в направлении оси оZ при ε_h = 50%.

Вытяжку образцов микропрофиля в направлении оси оХ оценивали, соответственно, как 2*ΔI/I*×100%, уширение боковых сторон микропрофиля в направлении оси оZ оценивали как 2*Δb/b*×100%, см. рис. 1. Анализируя характер смещения боковых сторон микропрофиля, можно заключить, что при высвобождении фиксации одной из пар боковых поверхностей микропрофиля ортогональная к ней деформировалась в большей степени относительно соответствующей поверхности при свободной схеме закрепления. При жестком закреплении выдавливание металла происходило навстречу движению индентора [11, 18].

Величину упрочнения материала σ_i (МПа) микропрофиля определяли по интенсивности напряжений²:

$$\sigma_{i} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{(\sigma_{x} - \sigma_{y})^{2} + (\sigma_{y} - \sigma_{z})^{2} + }{(\sigma_{z} - \sigma_{x})^{2} + 6(\tau_{xy}^{2} + \tau_{yz}^{2} + \tau_{xz}^{2})}}.$$

На рис. 7 показано влияние степени осадки микронеровностей ε_h на интенсивность напряжений σ_i для свободного и жесткого закрепления микропрофиля (см. рис. 2, табл. 1).

На рис. 8 представлено влияние типа нагружения модели микронеровностей на интенсивность напряжений σ_i для микровыступов 1, 2 и 3 при их осадке на 50% (см. рис. 2, 3, табл. 1).

Изополосы интенсивности напряжений микронеровностей *о*, представлены на рис. 9 при деформировании на 50% для исследуемых схем нагружения (см. табл. 2).

Возрастание осадки микропрофиля (см. рис. 7) приводит к увеличению интенсивности напряжений. Следует отметить, что до величины осадки в 20% НС под пиками возрастает сильнее (особенно для жесткого закрепления), затем интенсивность возрастания падает. На протяжении деформирования в 5–35% НС для жесткого закрепления превышает НС остальных схем закрепления микропрофиля. У последних наблюдался спад увеличения НС при осадке в 5–10%, затем градиент интенсивности возрастания

Таблица 2. Величина вытяжки и уширения боковых сторон микропрофиля **Table 2.** Value of microprofile sides drawing and widening

Вид нагружения (фиксации) образца										
свободное закрепление		полусвободное закрепление № 1		полусво закрепле	ободное ение № 2	жесткое закрепление				
	Перемещение по осям, %									
οХ	οZ	οХ	οZ	οХ	οZ	οХ	οZ			
4	11	0	13	7	0	0	0			



Рис. 7. Влияние степени деформирования микропрофиля на максимальную интенсивность напряжений: а – под вершиной микропрофиля: 1 – т. а (свободное закрепление); 2 – т. b (свободное закрепление); 3 – т. с (свободное закрепление); 4 – т. а, b, с (жесткое закрепление); b – под впадиной микропрофиля: 1 – т. d (свободное закрепление); 2 – т. е (свободное закрепление); 3 – т. f (свободное закрепление); 4 – т. d, е, f (жесткое закрепление)

Fig. 7. Influence of microprofile deformation degree on maximum stress intensity: a – under the microprofile peak:

1 – m. a (free fixing); 2 – m. b (free fixing); 3 – m. c (free fixing); 4 –m. a, b, c (rigid fixing);

b - under the microprofile valley: 1 - m. d (free fixing); 1 - m. e (free fixing); 1 - m. f (free fixing); 4 - m. d, e, f (rigid fixing)



Рис. 8. Влияние типа нагружения модели микронеровностей на максимальную интенсивность напряжений для микровыступов 1, 2 и 3: а – под вершиной микропрофиля (т. a, b, c); b – под впадиной микропрофиля (т. d, e, f) **Fig. 8.** Influence of the microroughness model loading type on maximum stress intensity for microprotrusions 1, 2 and 3: a – under the microprofile peak (m. a, b, c); b – under the microprofile valley; (m. d, e, f)

увеличился. Необходимо отметить, что НС у полусвободных схем закрепления незначительно превысило (порядка 70–100 МПа) НС жесткой схемы закрепления на конечном этапе осадки. Увеличение НС под впадинами микронеровностей имело практически линейный характер для сводной и полусвободных схем закрепления. У жесткой схемы закрепления после 5% осадки градиент интенсивности возрастания был выше остальных схем закрепления и при осадке в 50% превосходил их по НС в 4–12 раз. Характер изменения НС под вершинами и впадинами микровыступов представлен на рис. 8. Видно (см. рис. 8), что максимальное значение НС под вершинами наблюдалось у второго типа нагружения, являлось одинаковым по всем микровыступам и составило порядка 1370 МПа. Для жесткого закрепления (тип нагружения 4) микропрофиля НС составило порядка 1170 МПа, и также было одинаково по всем микровыступам. Под впадинами микровыступов максимальное значение НС наблюдалось у Вулых Н.В., Пономарев Б.Б. Моделирование и расчёт напряженно-деформированного состояния микропрофиля... Vulykh N.V., Ponomarev B.B. Stress-strain state simulation and calculation of a microprofile under orthogonal impact depending...



Рис. 9. Участки распределения интенсивности напряжений микропрофиля от (ϵ h = 50%): а – свободное закрепление; b – полусвободное закрепление № 1; с – полусвободное закрепление № 2; d – жесткое закрепление **Fig. 9.** Distribution areas of σ_i microprofile stress intensity (ϵ_h = 50%): а – free fixing; b – semi-free fixing no.1; с – semi-free fixing no.2; d – rigid fixing

жесткого закрепления, было одинаковым по всем микровыступам и составляло порядка 1190 МПа. Разброс НС по микровыступам присутствовал у свободной схемы закрепления, а также у стесненной по оси оZ. Причем в обоих случаях увеличение НС наблюдалось при движении от крайнего микровыступа 1 к центральному 3 (см. рис. 3). Исключение составила средняя зона под третьим пиком микровыступа (тип нагружения 3), у которого НС составило порядка 1050 МПа и было меньше примерно на 100 МПа относительно 1 и 2 микровыступов.

При осадке микропрофиля в 50% равномерное распределение HC по микровыступам наблюдалось при полусвободном закреплении № 1, а также при жестком закреплении. Однако при полусвободном закреплении № 1 перепад HC под пиком и впадиной составил порядка 950 МПа (см. рис. 8), причем HC было сконцентрировано у вершин микропрофиля. При жестком закреплении микропрофиля перепад HC под пиком и впадиной составил около 20 МПа (см. рис. 8), при этом распределение HC по сечению микровыступов было более однородным (см. рис. 9). Для свободной и полусвободной схемы закрепления № 2 HC имело неравномерное распределение по микровыступам и в области впадин (см. рис. 9). Однородность НС по сечению микропрофиля возрастала в следующей последовательности: свободное закрепление, полусвободное закрепление № 2, полусвободное закрепление № 1, жесткое закрепление (см. табл. 2, рис. 8, 9). Таким образом, теоретически формирование НС в поверхностном слое заготовки при обработке локальным ППД может снижаться у границ обрабатываемых поверхностей.

Установлено, что у схемы нагружения с жестким закреплением происходит наиболее качественное выглаживание микропрофиля с формированием более однородного HC по сечению микропрофиля. Данная схема нагружения теоретически может являться наиболее эффективной при локальных способах обработки деталей машин ППД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Увеличение степени стеснения модели микронеровностей, характеризующейся ограниченной подвижностью ее боковых граней и основания, при переходе от свободной к стесненной схеме нагружения способствовало повышению угла у основания деформированного микропрофиля

Polytech Journal $\frac{2025.1.23.10}{2025;29(1):10-21}$

ISSN 2782-6341 (online)

с 35 до 58°, относительной длины сглаженного участка с 0,46 до 0,8, а также вертикального подъема точки впадин микропрофиля с 0,012 до 0,21.

2. При высвобождении фиксации одной из пар боковых поверхностей микропрофиля ортогональная к ней деформировалась в большей степени относительно соответствующей поверхности при свободном закреплении. Максимальная вытяжка образца в направлении оси оХ составила 7%, в направлении оси оZ – 13%.

3. НС под пиками микронеровностей при полной осадке, в зависимости от типа нагружения и расположения микровыступов, составляло от 1050 до 1370 МПа и превысило

предел прочности образцов в 5-7 раз. Во впадинах напряженное состояние достигло максимального значения в 1190 МПа для жесткой схемы закрепления и превзошло остальные схемы закрепления в 4-12 раз, с превышением предела прочности образцов в 0,5-6 раз.

4. Наименьшая однородность НС по сечению микропрофиля была у образцов со свободным закреплением, наибольшая – у образцов с жестким закреплением.

5. При схеме нагружения с жестким закреплением происходит наиболее качественное выглаживание микропрофиля с формированием более однородного НС по сечению микропрофиля.

Список источников

1. Зайдес С.А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 3. С. 129–139. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139. EDN: YARHJB.

2. Зайдес С.А., Машуков А.Н. Применение технологии алмазного выглаживания для улучшения микрогеометрии затворных узлов арматуры высокого давления // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 1. С. 5–14. https://doi.org/10.26730/1999-4125-2019-1-5-13. EDN: NVOUGP.

3. Kuznetsov V., Smolin I., Skorobogatov A., Akhmetov A. Finite element simulation and experimental investigation of nanostructuring burnishing AISI 52100 steel using an inclined flat cylindrical tool // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. Iss. 9. P. 5324. https://doi.org/10.3390/app13095324. EDN: RHXGFE.

4. Нго Као Кыонг, Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Оценка качества упрочненного слоя при поверхностном пластическом деформировании роликами разных конструкций // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 1. С. 30–37. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-30-37. EDN: YMMWDW. 5. Кроха В.А. Кривые упрочения металлов при холодной деформации. М.: Машиностроение, 1968. 131 с. EDN: SHJAKZ.

6. Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. Исследование влияния технологических факторов процесса поверхе ностного пластического деформирования сложно профильным инструментом на качество поверхностного слоя // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 2. С. 68–74. EDN: BZXTEC.

7. Махалов М.С., Блюменштейн В.Ю. Механика процесса ППД. Остаточные напряжения в упрочняемом упругопластическом теле // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2019. Т. 21. № 2. С. 110–123. https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.2-110-123. EDN: IZSBDL.

8. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.

9. Grzesik W., Zak K. Characterization of surface integrity produced by sequential dry hard turning and ball burnishing operations // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2014. Vol. 136. Iss. 3. P. 031017. https://doi.org/ 10.1115/1.4026936.

10. Зайдес С.А., Нго Као Кыонг. Влияние поверхностного пластического деформирования в стесненных условиях на качество упрочненного слоя // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 11. С. 491–494. EDN: ZRQVHX.

11. Вулых Н.В., Вулых А.Н. Моделирование и расчёт упругопластической деформации микропрофиля при ортогональном стесненном нагружении // Вестник машиностроения. 2022. № 7. С. 80–84. https://doi.org/ 10.36652/0042-4633-2022-7-80-84. EDN: DRTPLH.

12. Зайдес С.А., Нго Као Кыонг. Технологическая интенсификация напряженного состояния в стесненных условиях локального нагружения // Вестник машиностроения. 2017. № 3. С. 5–8. EDN: YUPOWT.

13. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Интенсификация напряженного состояния в очаге деформации при локальном воздействии деформирующего инструмента // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 580–592. https://doi.org/ 10.21285/1814-3520-2022-4-580-592.

14. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Оценка геометрических параметров отпечатка и давления в зоне контакта рабочего инструмента при реверсивном поверхностном пластическом деформировании // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 3. С. 34–45. https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-3-34-45. EDN: GBGOIO.

Вулых Н.В., Пономарев Б.Б. Моделирование и расчёт напряженно-деформированного состояния микропрофиля...

Vulykh N.V., Ponomarev B.B. Stress-strain state simulation and calculation of a microprofile under orthogonal impact depending...

15. Zaides S.A., Pham Van Anh. Improvement of calibrated steel quality by surface deformation. Part 1: Determination of the stress state of cylindrical parts during orbital surface deformation // Steel in Translation. 2020. Vol. 50. Iss. 11. P. 745–749. https://doi.org/10.3103/S0967091220110145. EDN: QMCCKG.

16. Zaides S.A., Le Hong Quang. State of stress in cylindrical parts during transverse straightening // Russian Metallurgy (Metally). 2019. Vol. 2019. Iss. 13. P. 1487–1491. https://doi.org/10.1134/S003602951913041X. EDN: EDNMKQ.

17. Vulykh N.V., Vulykh A.N. Computer simulation of microprofile strain under orthogonal impact at constrained load. Part 1 // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov. Cham: Springer, 2021. Part 1. P. 891–899. https://doi.org/ 10.1007/978-3-030-54817-9_103.

18. Вулых Н.В., Вулых А.Н. Численный расчет напряженно-деформированного состояния микропрофиля при ори тогональном воздействии в условиях стесненного нагружения // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 538–548. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-538-548. EDN: EKZXRF.

19. Vulykh N.V. Centrifugal rolling of flexible shafts for achieving best possible roughness of the surface // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. A. Radionov, O. Kravchenko, V. Guzeev, Y. Rozhdestvenskiy. Cham: Springer, 2020. Vol. 2. P. 1079–1088. https://doi.org/ 10.1007/978-3-030-22063-1_115.

20. Лившиц О.П., Гридин Г.Д., Древин А.К. Влияние технологических факторов изготовления уплотнительных элементов на герметичность затворов сосудов высокого давления // Вестник машиностроения. 1978. № 11. С. 28–30.

21. Демкин Н.Б. Контактирование шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 227 с. EDN: YKDVDD.

22. Шнейдер Ю.Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. Л.: Машиностроение, 1972. 240 с.

23. Chen Xiaolin, Liu Yiijun. Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench: CRC Press, 2014. 411 p.

24. Nikolaeva E.P., Mashukov A.N. Evaluation of residual stresses in high-pressure valve seat surfacing // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Vol. 53. Iss. 7-8. P. 459–463. https://doi.org/10.1007/s10556-017-0363-1.

25. Gridin G.D. New in development of high-pressure angle shutoff valves // Chemical and Petroleum Engineering. 2012. Vol. 47. Iss. 9-10. P. 683–686. https://doi.org/10.1007/s10556-012-9532-4.

26. Pogodin V.K., Belogolov Yu.I., Gozbenko V.E., Kargapoltsev S.K., Olentsevich V.A., Gladkih A.M. Calculation of sealing pressures of shut-off valves // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2021. Vol. 1064. lss. 1. P. 012035. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012035.

27. Serebrennikova A.G., Nikolaeva E.P, Savilov A.V., Timofeev S.A., Pyatykh A.S. Research results of stressstrain state of cutting tool when aviation materials turning // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944. Iss. 1. P. 012104. https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012104.

28. Никитин Г.С., Галкин М.П., Жихарев П.Ю. Влияние внеконтактных зон на усилия деформирования в процессах обработки металлов давлением // Металлург. 2012. № 10. С. 61–65. EDN: PPLSWX.

References

1. Zaides S.A. New surface plastic deformation techniques in the manufacture of machine parts. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2018;16(3):129-139. (In Russ.). https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139. EDN: YARHJB.

2. Zaides S.A., Mashukov A.N. Application of diamond smoothing technology to improve the microgeometry of the valves of high pressure piping. *Bulletin of the Kuzbass state technical university*. 2019;1:5-14. (In Russ.). https://doi.org/ 10.26730/1999-4125-2019-1-5-13. EDN: NVOUGP.

3. Kuznetsov V., Smolin I., Skorobogatov A., Akhmetov A. Finite element simulation and experimental investigation of nanostructuring burnishing AISI 52100 steel using an inclined flat cylindrical tool. *Applied Sciences*. 2023;13(9):5324. https://doi.org/10.3390/app13095324. EDN: RHXGFE.

4. Ngo Cao Cuong, Zaides S.A., Le Hong Quang. Hardened layer quality evaluation at surface plastic deformation by rollers of different designs. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(1):30-37. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-30-37. EDN: YMMWDW.

5. Krokha V.A. *Curves of metal hardening under cold deformation*. Moscow: Mashinostroenie; 1968, 131 p. (In Russ.). EDN: SHJAKZ.

6. Blumenshtein V.Yu., Mitrofanova K.S. Study on effect of technological factors of surface plastic deformation process by complex-profile tool on quality of surface layer. *Strengthening Technologies and coatings*. 2020;16(2):68-74. (In Russ.). EDN: BZXTEC.

7. Makhalov M.S., Blumenstein V.Yu. Surface plastic deformation mechanics. The residual stresses in the hardened elastic-plastic body. *Metal Working and Material Science*. 2019;21(2):110-123. (In Russ.). https://doi.org/ 10.17212/1994-6309-2019-21.2-110-123. EDN: IZSBDL.

8. Papshev D.D. *Finishing and hardening treatment by surface plastic deformation*. Moscow: Mashinostroenie; 1978, 152 p. (In Russ.).

iPolytech Journal

2025;29(1):10-21

ISSN 2782-6341 (online)

9. Grzesik W., Zak K. Characterization of surface integrity produced by sequential dry hard turning and ball burnishing operations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2014;136(3):031017. https://doi.org/ 10.1115/1.4026936.

10. Zaides S.A., Ngo Kao Kyong. Influence of surface plastic deformation in cramped conditions on surface layer quality. *Strengthening Technologies and coatings*. 2017;13(11):491-494. (In Russ.). EDN: ZRQVHX.

11. Vulykh N.V., Vulykh A.N. Modeling and calculation of elastic-plastic microprofile deformation under orthogonal constrained loading. *Russian Engineering Research*. 2022;7:80-84. (In Russ.). https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-7-80-84. EDN: DRTPLH.

12. Zaides S.A., Ngo Kao Kyong. Technological intensification of the stress state in confined conditions of local loading. *Russian Engineering Research*. 2017;3:5-8. (In Russ.). EDN: YUPOWT.

13. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Intensification of stress state at deformation site under local action of a deformation tool. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):580-592. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-580-592.

14. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Evaluation of the imprint geometric parameters and pressure in the working tool contact zone under the reversible surface plastic deformation. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2023;3:34-45. (In Russ.). https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-3-34-45. EDN: GBGOIO.

15. Zaides S.A., Pham Van Anh. Improvement of calibrated steel quality by surface deformation. Part 1: Determination of the stress state of cylindrical parts during orbital surface deformation. *Steel in Translation*. 2020;50(11):745-749. https://doi.org/10.3103/S0967091220110145. EDN: QMCCKG.

16. Zaides S.A., Le Hong Quang. State of stress in cylindrical parts during transverse straightening. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019;2019(13):1487-1491. https://doi.org/10.1134/S003602951913041X. EDN: EDNMKQ. 17. Vulykh N.V., Vulykh A.N. Computer simulation of microprofile strain under orthogonal impact at constrained load. Part 1. In: Radionov A. A., Gasiyarov V. R. (eds.). *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering*. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer; 2021, part 1, p. 891-899. https://doi.org/ 10.1007/978-3-030-54817-9_103.

18. Vulykh N.V., Vulykh A.N. Stress-strain numerical simulation for a microprofile subjected to orthogonal impact under constrained loading conditions. *iPolytech Journal.* 2021;25(5):538-548. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-538-548. EDN: EKZXRF.

19. Vulykh N.V. Centrifugal rolling of flexible shafts for achieving best possible roughness of the surface. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds.). *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Cham: Springer; 2020. Vol. 2. P. 1079-1088. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_115.

20. Livshits O.P., Gridin G.D., Drevin A.K. Influence of technological factors of sealing element manufacturing on high-pressure vessel seal tightness. *Russian Engineering Research*. 1978;11:28-30. (In Russ.).

21. Demkin N.B. Rough surface contacting. Moscow: Nauka; 1970, 227 p. (In Russ.). EDN: YKDVDD.

22. Schneider Y.G. Formation of regular microreliefs on parts and their operation properties. Leningrad: Mashinostroenie; 1972, 240 p. (In Russ.).

23. Chen Xiaolin, Liu Yiijun. *Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench*: CRC Press; 2014, 411 p.

24. Nikolaeva E.P., Mashukov A.N. Evaluation of residual stresses in high-pressure valve seat surfacing. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017;53(7-8):459-463. https://doi.org/10.1007/s10556-017-0363-1.

25. Gridin G.D. New in development of high-pressure angle shutoff valves. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2012;47(9-10):683-686. https://doi.org/10.1007/s10556-012-9532-4.

26. Pogodin V.K., Belogolov Yu.I., Gozbenko V.E., Kargapoltsev S.K., Olentsevich V.A., Gladkih A.M. Calculation of sealing pressures of shut-off valves. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021;1064(1):012035. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012035.

27. Serebrennikova A.G., Nikolaeva E.P, Savilov A.V., Timofeev S.A., Pyatykh A.S. Research results of stressstrain state of cutting tool when aviation materials turning. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;944(1):012104. (In Russ.). https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012104.

28. Nikitin G.S., Galkin M.P., Zhikharev P.Yu. Effect of out-of-contact zones on deforming forces at metal forming processes. *Metallurg.* 2012;10:61-65. (In Russ.). EDN: PPLSWX.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вулых Николай Валерьевич,

к.т.н., доцент, доцент кафедры материаловедения сварочных и аддитивных технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия Vulix2011@yandex.ru https://orcid.org/0000-0002-2607-4302

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay V. Vulykh,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia ⊠ vulix2011@yandex.ru https://orcid.org/0000-0002-2607-4302 Вулых Н.В., Пономарев Б.Б. Моделирование и расчёт напряженно-деформированного состояния микропрофиля... Vulykh N.V., Ponomarev B.B. Stress-strain state simulation and calculation of a microprofile under orthogonal impact depending...

Пономарев Борис Борисович,

д.т.н., профессор,
начальник управления по дополнительному
образованию и социальной работе,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
pusw@ex.istu.edu
https://orcid.org/0000-0003-1185-8638

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 16.01.2024 г.; одобрена после рецензирования 20.03.2024 г.; принята к публикации 09.09.2024 г.

Boris B. Ponomarev,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Industries, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia pusw@ex.istu.edu https://orcid.org/0000-0003-1185-8638

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 16.01.2024; approved after reviewing 20.03.2024; accepted for publication 09.09.2024.

Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 22-32 2025:29(1):22-32

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья УДК 621.314.58 EDN: HIESRX DOI: 10.21285/1814-3520-2025-1-22-32

Анализ вариаций угловых координат режущего инструмента при изменении условий резания в процессе выполнения технологических операций

О.А. Ерзин^{1⊠}, С.А. Васин², А.С. Клентак³

^{1,2}Тульский государственный университет, Тула, Россия ³Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

Резюме. Цель - оптимизация условий резания путем управления кинематическими углами режущего инструмента при обработке фасонных поверхностей и технологически обусловленном изменении режимных параметров процесса резания. Объектом исследований явились условия резания при обработке фасонных поверхностей, их влияние на режимные параметры процесса резания, кинематические углы режущего инструмента (передний и главный в плане) и наклона режущей кромки. При построении математических моделей использовались методы теории резания, теоретической механики и термодинамики. Проведенный анализ геометрии лезвия режущего инструмента как в статике, так и в кинематике показал, что изменение угловых координат передней поверхности лезвия при различных условиях резания в процессе выполнения технологических операций требует внедрения управляемых осей поворота. Эти оси должны регулировать основные углы лезвия: главный, передний и угол наклона режущей кромки. При заглублении инструмента более 85% кинематические углы интенсивно изменяются даже при относительно небольших погрешностях его установки. Предложено ввести управляемые оси поворота передней поверхности лезвия режущего инструмента по ее основным углам: главному, переднему и углу наклона режущей кромки. Показано, что кинематические углы интенсивно изменяются даже при относительно небольших погрешностях его установки. Выявлено, что данные углы конструктивно ограничивают диапазон регулирования переднего угла режущего инструмента в связи с недопустимым уменьшением заднего угла, необходим их учет при расчете силовых характеристик процесса резания. Таким образом, для решения проблемы стабилизации кинематических углов режущего инструмента нужно разрабатывать новые методы и технологии, которые позволят более точно контролировать кинематические параметры в процессе резания. Важно учитывать влияние различных факторов, таких как материал обрабатываемой детали, тип режущего инструмента и режимы резания.

Ключевые слова: управление кинематическими углами, режущий инструмент, обработка, фасонные поверхности, параметры процесса резания, оптимизация, условия резания

Для цитирования: Ерзин О.А., Васин С.А., Клентак А.С. Анализ вариаций угловых координат режущего инструмента при изменении условий резания в процессе выполнения технологических операций // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 1. С. 22–32. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-22-32. EDN: HIESRX.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Analysis of changes in angular coordinates of cutting tools when conducting technological operations under different cutting conditions

Oleg A. Erzin¹[∞], Sergey A. Vasin², Anna S. Klentak³

^{1,2}Tula State University, Tula, Russia

³Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

Abstract. This study aims to optimize cutting conditions by controlling the working angles of cutting tools when machining shaped surfaces and changing operating parameters of the cutting process for technological reasons. The study object includes cutting conditions for machining shaped surfaces, their influence on the

© Ерзин О.А., Васин С.А., Клентак А.С., 2025 22 _____



Ерзин О.А., Васин С.А., Клентак А.С. Анализ вариаций угловых координат режущего инструмента при изменении условий... **Erzin O.A., Vasin S.A., Klentak A.S.** Analysis of changes in angular coordinates of cutting tools when conducting technological...

operating parameters of the cutting process, the working angles of cutting tools (rake angle and lead angle), and cutting edge inclination. When developing mathematical models, we used methods of the theory of cutting, analytical mechanics, and thermodynamics. Static and kinematic geometry analysis of a blade in a cutting tool showed that changes in the angular coordinates of the front surface of a blade require the introduction of controlled rotation axes when conducting technological operations under different cutting conditions. These axes should control the main blade angles, i.e., lead angle, rake angle, and cutting edge inclination. With more than 85% of the tool penetration, the working angles considerably change even when its installation errors are relative-Iv small. It is proposed to introduce controlled rotation axes of the front surface of a blade in a cutting tool by its main angles, i.e., lead angle, rake angle, and cutting edge inclination. It is shown that working angles considerably change even when its installation errors are relatively small. The study revealed that these angles constructively limit the regulation range of the rake angle of a cutting tool due to the impermissible reduction of the back relief angle; these angles should be taken into account when calculating the power characteristics of the cutting process. Thus, in order to solve the problem of stabilizing the working angles of cutting tools, new methods and technologies should be developed, which would make it possible to control kinematic parameters in the cutting process more accurately. It is important to take into account the influence of various factors such as workpiece material, cutting tool type, and cutting conditions.

Keywords: kinematic angle control, cutting tool, machining, profiled surfaces, cutting process parameters, optimization, cutting conditions

For citation: Erzin O.A., Vasin S.A., Klentak A.S. Analysis of changes in angular coordinates of cutting tools when conducting technological operations under different cutting conditions. *iPolytech Journal*. 2025;29(1):22-32. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-22-32. EDN: HIESRX.

введение

Управляемые координаты в металлорежущих станках с числовым программным управлением (ЧПУ) решают задачи формообразования поверхностей обрабатываемых деталей или настроечных перемещений. Режимы резания определяются скоростями резания и перемещений по управляемым координатам, а также величиной снимаемого припуска, которая в общем случае также зависит от направлений этих скоростей, определяющих сечение срезаемого слоя. Координаты инструмента – положение режущей кромки в системе координат станка или детали считаются неизменными и задаются корректорами в ЧПУ.

Геометрия лезвия режущего инструмента описывается в статической и кинематической системах координат. Известно, что основные угловые характеристики инструмента [1, 2] определяют положение его передней поверхности относительно векторов скоростей резания и подачи. В процессе обработки они могут изменяться, например, в соответствии с контуром обрабатываемой поверхности или скорости резания, в этом случае они называются кинематическими [3–7]. Данный факт позволяет рассматривать режущий инструмент как сложную многокоординатную инструментальную систему (ИС) [8].

В проведенных ранее исследованиях [9] отмечены специфические закономерности, отражающие особенности токарных операций отрезки: изменение переднего угла приводит к уменьшению нормальной составляющей силы стружкообразования, а момент поворота режущего клина вокруг режущей кромки, обусловленный действием этой силой, носит экстремальный характер. В то же время значения момента поворота режущего клина относительно режущей кромки незначительны и указывают на высокую энергоэффективность управления его передним углом.

В исследованиях [10–12], в зависимости от профиля обрабатываемой детали, показаны различные варианты расположения центра поворота резца и для управления главным углом в плане и передним углом резца. Предложено в систему координат инструмента ввести две переносные цилиндрические системы управляемых координаты.

В исследованиях [13] установлено, что устройство управления процессом резания по переднему углу режущего клина технически реализуемо.

На рис. 1 представлена система координат инструмента и их взаимосвязи [1, 4, 6]. В соответствии с известными определениями, на рис. 1 показаны:

основная плоскость – плоскость 0_PX_PY_P;
 плоскость резания – касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и перпендикулярная основной плоскости;

– поперечная плоскость – плоскость $0_P X_P Z_P;$

 главная секущая плоскость – плоскость, перпендикулярная проекции главной режущей кромки на основную плоскость. 2025. T. 29. № 1. C. 22-32 2025;29(1):22-32



Рис. 1. Системы координат инструмента и их взаимосвязи: С-С – статическая плоскость резания; А-А – главная секущая плоскость резания

Fig. 1. Tool coordinate systems and their relationships: C-C - static cutting plane; A - main cutting secant plane

Известно, что условия резания в значительной степени определяются по передней поверхности лезвия ИС. Она характеризуется формой, режущими кромками и вершиной. Положение этой поверхности относительно скорости резания определяет условия резания, технологические возможности и показатели операций, связанных с отделением припуска от заготовки [2-7].

К основным углам лезвия ИС, определяющим положение его передней поверхности, относятся передний угол у, главный угол в плане φ , угол наклона режущей кромки λ [1, 2]. Соответственно, это:

- угол между основной плоскостью и линией пересечения передней поверхности с главной секущей плоскостью;

- наименьший угол между проекцией главной режущей кромки на основную плоскость и поперечной плоскостью;

 угол между главной режущей кромкой и основной плоскостью (расположен в плоскости резания).

В качестве примера различных видов геометрии лезвия ИС на рис. 2 приведены схемы продольного точения и отрезки.

Сечение срезаемого слоя определяет основные характеристики процесса стружкообразования и мощность резания:

$$a_1 \cdot b_1 = S_0 \cdot t_P; a_1 = S_0 \cdot \sin \varphi; b_1 = \frac{t_P}{\sin \varphi};$$
$$\alpha = \frac{\pi}{2} - (\beta + \gamma); \varphi_1 = \pi - (\varphi + \varepsilon_k), \quad (1)$$

где a_1, b_1 – толщина и ширина среза, м; S_0, t_P – подача на оборот и глубина резания, м; $\varphi, \varphi_1, \varepsilon_k$ – углы в плане: главный, вспомогательный и при вершине резца, °; γ , α , β – передний, задний углы и угол заострения, °.

Ерзин О.А., Васин С.А., Клентак А.С. Анализ вариаций угловых координат режущего инструмента при изменении условий... **Erzin O.A., Vasin S.A., Klentak A.S.** Analysis of changes in angular coordinates of cutting tools when conducting technological...



Рис. 2. Схемы токарной обработки: а – продольное точение; b – отрезка и прорезка канавок **Fig. 2.** Turning diagrams: а – longitudinal turning; b – cutting and grooving

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью является оптимизация условий резания путем управления кинематическими углами режущего инструмента при обработке фасонных поверхностей и технологически обусловленном изменении режимных параметров процесса резания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нарушение стационарности процесса резания влияет на все технологические параметры операций точения и обусловлено множеством факторов, которые могут иметь как стохастический, так и детерминированный характер. Стохастические факторы связаны с колебаниями припуска на обработку, параметрами режима резания, а также характеристиками заготовок, инструмента и оборудования. К детерминированным факторам относятся технологически предопределенные изменения скорости резания, что особенно актуально для операций, таких как отрезка, прорезка канавок, подрезка торца или поперечное точение [4, 6, 7, 9], или направления вектора подачи при фасонном точении [4, 6, 7, 10]. К ним в том числе следует отнести изменение кинематических углов лезвия ИС в зависимости от его установки, показанное на рис. 3 [6, 9].

Кинематические углы вычисляются на основе известных геометрических принципов соотношений следующим образом [6] (на рис $d\gamma$, h):



Рис. 3. Влияние положения режущей кромки резца относительно линии центров на его передний и задний кинематические углы: а – ниже центров; b – выше центров; 0-Т – плоскость резания; О-N – линия, проходящая через ось вращения заготовки и точку пересечения режущей кромкой секущей плоскости

Fig. 3. Effect of the cutter cutting edge position relative to the center line on its front and rear kinematic angles: a – below the centers; b – above the centers; O-T – cutting plane; O-N – line passing through the workpiece rotation axis and the intersection point of the cutting edge and the cutting plane

Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 22-32 2025;29(1):22-32

$$\gamma_{k} = \gamma + d\gamma_{ky} + d\gamma_{kV}; \ \alpha_{k} = \frac{\pi}{2} - (\beta + \gamma_{k});$$
$$\varphi_{k} = \varphi - d\varphi_{kF}; \ \varphi_{1k} = \pi - (\varphi_{k} + \varepsilon_{k});$$

$$d\varphi_{kF} = arctg(F_x/F_z); d\gamma_{ky} = arcsin(2h_{P=}/D_t);$$

$$d\gamma_{kV} = \operatorname{arcctg}\left(\frac{V}{S_0 \cdot n_q \cdot \sin \theta_{VS}} + \operatorname{ctg} \theta_{VS}\right), \quad (2)$$

для отрезки
$$\theta_{VS} = -\frac{\pi}{2} - d\gamma_{ky}$$
;
 $D_t = D_0 - S_0 \cdot n \cdot t = D_0(1 - T_{otn});$
 $T_{otn} = \frac{t}{t_k}; t_k = \frac{D_0}{2 \cdot S_0 \cdot n_q},$

ГДе γ_k , α_k , φ_k , φ_{1k} – КИНЕМАТИЧЕСКИЕ УГЛЫ ЛЕЗ-ВИЯ ИС: передний и задний, а также главный и вспомогательный в плане соответственно, °; $d\gamma_{ky}$, $d\gamma_{kV}$ – изменение переднего кинематического угла, вызванное ошибками установки инструмента и колебаниями скорости резания; $d\varphi_{kF}$ – изменение главного кинематического угла в плане, обусловленное изменением соотношения составляющих подачи по координатным осям F_x , F_x , F_x , F_z , θ_{VS} – угол между векторами скорости резания и результирующей подачи, °; $h_{p=}$, D_0 , D_t – погрешность установки резца, начальное и текущее значение диаметра заготовки в процессе отрезки, м; T_{otn} – относительное время выполнения операции; n_q – скорость вращения заготовки, с⁻¹.

Например, по ходу операций отрезки и прорезки канавок, уменьшение скорости резания, вызванное изменением диаметра обрабатываемой поверхности, является причиной существенного изменения условий резания, связанного с уменьшением скорости резания:

$$V_P = V_0(1 - T_{otn}); V_0 = \frac{C_v}{T_P^{xt} \cdot S_o^{xs}},$$
 (3)

где V_0 – рекомендованное значение скорости резания при выполнении операций отрезки и прорезки канавок, м/мин; T_P – период стойкости резца, мин; C_{ν} , xt, xs – постоянные коэффициенты^{4,5}.

На операции отрезки в процессе заглубления инструмента в заготовку без учета уменьшения скорости резания, изменение кинематических углов лезвия ИС при $\gamma = 10^{\circ}$, $\beta = 58^{\circ}$ и различных значениях погрешности его установки приведены на рис. 4.

Из приведенных зависимостей видно, что при заглублении инструмента



Рис. 4. Зависимости переднего (а) и заднего (b) углов лезвия инструментальной системы от величины заглубления при различных значениях погрешности его установки (красные линии h/D > 0, черные линии h/D > 0) **Fig. 4.** Dependences of the front (a) and rear (b) tool edge angles on the penetration depth at different values of the tool installation error (red lines h/D > 0, black lines h/D > 0)

⁴Ачеркан Н.С. Справочник металлиста. В 5 т; т. 4. М.: Машгиз, 1959. 778 с.

⁵Косилова А.Г., Мещеряков Р.К. Справочник технолога-машиностроения. В 2-х т; т. 1. М.: Машиностроение, 1990. 495 с.

 $(D_0 - D_t)/D_0 = T_{otn}$ более 85% кинематические углы интенсивно изменяются даже при относительно небольших погрешностях его установки. Причем погрешность установки инструмента конструктивно ограничивает диапазон регулирования переднего угла режущего инструмента ввиду недопустимого уменьшения заднего угла. Это явление требует учета при расчете силовых характеристик процесса резания [14–16].

Следует отметить, что, исходя из конструктивных соотношений при вариациях кинематических углов переднего и главного в плане, углы заострения и при вершине в плане резца остаются неизменными.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Взаимосвязь между основными углами лезвия ИС определяется из известных геометрических соотношений [6, 11, 12] рис. 1:

$$tg\gamma_{y} = \cos \varphi \cdot tg\gamma - \sin \varphi \cdot tg\lambda;$$

$$tg\gamma_{x} = \sin \varphi \cdot tg\gamma + \cos \varphi \cdot tg\lambda, \qquad (4)$$

или

 $tg\gamma = \sin \varphi \cdot tg\gamma_x + \cos \varphi \cdot tg\gamma_y;$

 $tg\lambda = \cos\varphi \cdot tg\gamma_x - \sin\varphi \cdot tg\gamma_y,$



Данная взаимосвязь представлена на рис. 5, где показано, что в исследуемом диапазоне изменения переднего угла (*Y*) и угла наклона режущей кромки (*λ*) зависимости (4) могут быть преобразованы в линейные и представлены следующим образом:

$$\gamma_{y} = \gamma \cdot \cos \varphi - \lambda \cdot \sin \varphi;$$

$$\gamma_{x} = \gamma \cdot \sin \varphi + \lambda \cdot \cos \varphi.$$
(5)

При изменении этих углов в традиционном диапазоне $\lambda = \pm 10^{\circ}$ и $\lambda = \pm 15^{\circ}$ погрешности аппроксимации тригонометрических выражений (4) рядами (5) достигают максимальных значений при $\varphi = 45^{\circ}$ и не превышают 1,6%. Указанного вполне достаточно для оценки характера поведения этих зависимостей.

Из них видно, при $\varphi > 45^{\circ}$ угол наклона зависимости $\gamma_y = f(\gamma)$ больше, чем $\gamma_x = f(\gamma)$, а при $\varphi < 45^{\circ}$ – наоборот. При возрастании φ у зависимости $\gamma_x = f(\gamma)$, он увеличивается, а у $\gamma_y = f(\gamma)$ уменьшается, причем более интенсивно.



Рис. 5. Зависимости углов между передней поверхностью и основной плоскостью в продольном и поперечном сечениях $(\gamma_y \ \gamma_x)$ от основных углов лезвия инструментальной системы $(\varphi, \ \lambda, \ \gamma)$ $(\gamma_y - красные линии, \ \gamma_x - синие линии): _{a-\varphi} = 40^\circ; _{b-\varphi} = 75^\circ$

Fig. 5. Dependences of the angles between the front surface and the main plane in longitudinal and transverse sections $(\gamma_y \gamma_x)$ on the main angles of the tool system edge $(\varphi, \lambda, \gamma)$: $(\gamma_y - \text{red lined}, \gamma_x - \text{blue lines})$: $_{a-}\varphi = 40^{\circ}$; $_{b-}\varphi = 75^{\circ}$

Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 22-32 2025:29(1):22-32

ISSN 2782-6341 (online)

При $\varphi < 45^{\circ}$ его влияние меняется на противоположное. Угол λ практически не оказывает влияния на углы наклона зависимостей $\gamma_x = f(\gamma)$ и $\gamma_y = f(\gamma)$. Его изменение от $\lambda = -10^{\circ}$ до $\lambda = +10^{\circ}$ приводит к их параллельному смещению для $\gamma_y = f(\gamma)$ в отрицательном направлении, а для $\gamma_x = f(\gamma)$ – в положительном.

Представляет интерес сравнительная оценка изменения этих углов, например $\Delta \gamma_{xy} = \gamma_x - \gamma_y$. Она иллюстрирует вышесказанное, определяет преимущественное направление движения стружки и представлена на рис. 6 *а*. В частности, можно видеть, что изменение φ приводит к изменению интенсивности преобладания одного из углов $\gamma_y = f(\gamma)$ или $\gamma_x = f(\gamma)$ в зависимости от переднего угла.

Интересно, что исходя из зависимостей (5) может быть получен некоторый аналог модуля вектора в плоскости γ_x и γ_y $R_{angl} = \sqrt{\gamma_y^2 + \gamma_x^2} = \sqrt{\lambda^2 + \gamma^2}$. Он не зависит в явном виде от переднего угла в плане φ . Это позволяет с точки зрения управляемых координат инструментальной системы (УОИС) рассматривать его как первую поворотную управляемую ось (УО). Фаза вектора R_{angl} определяется также из (5): $\varphi_{angl} = arctg(\gamma_y/\gamma_x) = arctg(\frac{\gamma - \lambda \cdot tg\varphi}{\gamma \cdot tg\varphi + \lambda})$. При постоянных значениях γ и λ фазовая характеристика представляет собой дугу окружности, положение которой и ее центральный угол зависят от φ .

Тогда фазовые характеристики в координатах $\gamma_y f(\gamma, \lambda, \varphi), \gamma_x f(\gamma, \lambda, \varphi)$ при изменении φ от 25° до 90° представляют собой концентрические окружности (см. рис. 6 b). Можно видеть, что характеристики для углов $\lambda = 10°$ идентичны характеристикам для $\lambda = -10°$, повернутым на 180°, а фазовая характеристика при $\lambda = 0°$ и $\gamma = 0°$ вырождается в ноль. Это указывает на тесную их взаимосвязь с точки зрения выбора УО поворота лезвия ИС и следует из очевидных соотношений: при $\varphi = 90°$ $\gamma_y = -\lambda, \gamma_x = \gamma$; при $\varphi = 0°$ $\gamma_y = \gamma, \gamma_x = \lambda$; при $\varphi = 45°$ и $\lambda = 0°$ $\gamma_y = 0,707 \cdot (\gamma - \lambda),$ $\gamma_x = 0,707 \cdot (\gamma + \lambda).$



Рис. 6. Зависимость относительного изменения углов наклона передней поверхности ($\Delta \gamma_{xy}$) от основных углов лезвия инструментальной системы (a) ($\varphi = 40^{\circ}$ – сплошная линия, $\varphi = 50^{\circ}$ – пунктирная линия, $\varphi = 90^{\circ}$ – пунктирная линия, $\varphi = 70^{\circ}$ – пунктирная линия, $\varphi = 90^{\circ}$ – пунктирная линия, $\varphi = 90^{\circ}$ – пунктирная линия, $\varphi = 90^{\circ}$ – пунктирная линия с точкой); фазовые характеристики углов (b) между передней поверхностью и основной плоскостью в продольном и поперечном сечениях γ_x и γ_y ($\gamma = 10^{\circ}$ – сплошная линия, $\gamma = 0^{\circ}$ – пунктирная линия, $\gamma = -10^{\circ}$ – пунктирная линия с точкой)

Fig. 6. Dependence of relative variation of front surface $(\Delta \gamma_{xy})$ inclination angles on the main angles of the tool system edge (a) $(\varphi = 40^{\circ} - \text{solid line}, \varphi = 50^{\circ} - \text{dashed line}, \varphi = 90^{\circ} - \text{dashed line with a point})$; phase characteristics of angles (b) between the front surface and the main plane in longitudinal and transverse sections γ_x and γ_y ($\gamma = 10^{\circ}$ - solid line, $\gamma = 0^{\circ}$ - dashed line, $\gamma = -10^{\circ}$ - dashed line with a point)

Ерзин О.А., Васин С.А., Клентак А.С. Анализ вариаций угловых координат режущего инструмента при изменении условий... **Erzin O.A., Vasin S.A., Klentak A.S.** Analysis of changes in angular coordinates of cutting tools when conducting technological...

Проведенный анализ показал, что несмотря на определенные достижения в управлении кинематическими углами режущего инструмента, задача их стабилизации при обработке фасонных поверхностей [10] и технологической обусловленности изменения режимных параметров процесса резания [9, 14, 15–20] остается весьма актуальной.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Использование поворотных систем координат для управления кинематическими углами лезвия ИС ставит вопрос о рациональном выборе центра поворота [10]. Критерием оптимальности являются характер и количество необходимых дополнительных движений, допустимые их скорости и ускорения. Неудачный выбор центра поворота может привести к принципиальной неосуществимости формообразования некоторых поверхностей или процесса обработки с заданной контурной скоростью подачи [10]. Это связано с невозможностью обеспечить однозначность положения режущей кромки относительно оси поворота лезвия ИС для различных условий резания и сопровождается снижением точности и ухудшением качества поверхности. Поэтому в основу предлагаемого подхода положено требование совмещения начала всех осей поворота режущей кромки и передней поверхности с вершиной ИС.

Такой подход позволяет на основании рассмотренных выше определений углов лезвия ИС выбрать систему УО. Исходя из известных определений [2, 5, 6] и приведенных выше рассуждений можно видеть, что определенные трудности в его реализации связаны с традиционно принятыми разными направлениями координатных осей в ИС и металлорежущих станках.

В станках с ЧПУ система координат инструмента предназначена для определения положения его настроечной точки, в частности вершины резца, в системе координат, например детали $O_1X_1Z_1$ (см. рис. 1). Технически она задается относительно нулевой точки инструментального блока O_B . Его оси координат блока $O_BX_BY_BZ_B$ параллельны осям стандартной системы координат станка и направлены в одну и ту же сторону.

Лезвие ИС характеризуется положением его вершины и режущих кромок в системе координат, связанной с ее основной плоскостью и вершиной $O_P X_P Y_P Z_P$. Вершина задается радиусом скругления r и координатами X_{OPB} , Z_{OPB} его центра в системе координат $O_B X_B Y_B Z_B$ инструментального блока (см. рис. 1). Они переводятся в систему координат станка через его базовую точку O_B .

Как отмечено выше, положение главной режущей кромки (резца) лезвия ИС помимо главного угла в плане φ задается углом ее наклона к основной плоскости λ и доопределяет, таким образом, положение его передней поверхности. Это обусловливает необходимость принятия в качестве второй управляемой координаты угол поворота λ вокруг оси 0_PX_{un1}, проходящей через вершину лезвия ИС перпендикулярно режущей плоскости. Для однозначного задания положения передней поверхности очевидно в качестве третьей управляемой координаты должен выступать передний угол γ , определяемый осью поворота 0_PZ_{up2}, проходящей по режущей кромке лезвия ИС (см. рис. 1).

УОИС будем обозначать по аналогии с УО станков с ЧПУ токарной группы. Плоскость, образованная скоростями подач станка $0_P X_{up0} Z_{up0}$, совпадает со статической основной плоскостью ИС $0_P X_P Y_P$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований выполнен анализ предметной области описания геометрии лезвия режущего инструмента в статике и кинематики. В результате анализа изменения угловых координат передней поверхности при изменении условий резания в процессе выполнения технологических операций предложено ввести управляемые оси поворота передней поверхности лезвия режущего инструмента по ее основным углам: главному, переднему и углу наклона режущей кромки.

Показано, что кинематические углы интенсивно изменяются даже при относительно небольших погрешностях его установки, и они конструктивно ограничивают диапазон регулирования переднего угла режущего инструмента в связи с недопустимым уменьшением заднего угла и требуют их учета при расчете силовых характеристик процесса резания.

Несмотря на определенные достижения в управлении кинематическими углами режущего инструмента, задача их стабилизаiPolytech Journal

2025:29(1):22-32

ISSN 2782-6341 (online)

ции при обработке фасонных поверхностей и технологически обусловленном изменении

режимных параметров процесса резания остается весьма актуальной.

Список источников

1. Кабалдин Ю.Г., Башков А.А. Самоорганизация и механизм трения при резании // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102. № 2. С. 167–173. https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-2-167-173. EDN: QPEWOW.

2. Кабалдин Ю.Г., Саблин П.А., Щетинин В.С. Управление динамической устойчивостью металлорежущих систем в процессе резания по фрактальности шероховатости обработанной поверхности // Frontier Materials & Technologies. 2023. № 3. С. 43–51. https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-3-65-4. EDN: PATDRX.

3. Бобров В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов. М.: Машгиз, 1962. 150 с.

4. Бобров В.Ф., Грановский Г.И., Зорев Н.Н., Исаев А.И., Клушин М.И., Ларин М.Н. [и др.]. Развитие науки о резании металлов. М.: Машиностроение, 1967. 416 с. EDN: XVPBFT.

5. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.

6. Вульф А.М. Резание металлов. Л.: Машиностроение, 1973. 496 с.

7. Телешевский В.И., Соколов В.А. Лазерная коррекция геометрических погрешностей многокоординатных систем с программным управлением // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 33–37.

8. Кузнецов А.П. Тепловое поведение и точность металлорежущих станков: монография. М.: Янус-К, 2011. 255 с. EDN: QNCVON.

9. Сальников В.С, Шадский Г.В, Ерзин О.А. Перспективы управления передним углом режущего клина при технологической обусловленности изменения скорости резания // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 12. С. 276–284. https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-12-276-277. EDN: RVCVLJ.

10. Ерзин О.А., Шадский Г.В., Шаталов Д.Д. Управление кинематическими углами резца в зависимости от профиля обрабатываемой детали // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 494–501. https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-8-494-495. EDN: INPCGN.

11. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. The features of the evolution of the dynamic cutting system due to the regenerative effect // Dynamics of technical systems: AIP Conference Proceedings of the 7 International Scientific-Technical Conference (Rostov-on-Don, 9–11 September 2023). Rostov-on-Don: American Institute of Physics Inc., 2023. Vol. 2507. Iss. 1. P. 030002. https://doi.org/10.1063/5.0109559. EDN: FLSYFX.

12. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения: монография. М.: Инфра-Инженерия, 2021. 356 с.

13. Сальников В.С., Шадский Г.В., Ерзин О.А. Анализ конструкторского решения «интеллектуального» режущего инструмента с управляемым передним углом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 10. С. 400–406. https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-10-400-406. EDN: IECIWG.

14. Шадский Г.В., Сальников В.С., Ерзин О.А. Анализ технических возможностей кинематическими углами режущего клина при точении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 12. С. 360–367. EDN: AZLAUI.

15. Шадский Г.В., Сальников В.С., Ерзин О.А. Перспективы управления кинематическими углами режущего клина на операциях точения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 12. С. 342–349. EDN: PLHGSV.

16. Сальников В.С., Шадский Г.В., Ерзин О.А. Техническое решение отрезного резца с управляемым передним углом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 2. С. 3–6. https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-2-3-4. EDN: YTQRUQ.

17. Евсеев Л.Л. Исходные положения и зависимости для расчета характеристик динамики процесса резания металлов // Вестник машиностроения. 1995. № 12. С. 3–7.

18. Евсеев Л.Л. Расчет оптимальной скорости резания по коэффициенту динамичности процесса стружкообразования // Станки. Инструмент. 1994. № 4. С. 41–43.

19. Волков Д.И., Проскуряков С.Л. Разработка модели процесса резания с учетом цикличности формирования стружки // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. Машиностроение. 2011. Т. 15. № 3. С. 72–78. EDN: PWTNTV.

20. Рыжкин А.А., Климов М.М., Сергеев Р.В. Особенности стружкообразования при обработке сталей твердыми сплавами с износостойкими покрытиями // Вестник Донского государственного технического университета. 2001. Т. 1. № 1. С. 47–53. EDN: SXQCTB.

References

1. Kabaldin Yu.G., Bashkov A.A. Self-organization and friction mechanism under cutting. *Russian Engineering Research.* 2023;102(2):167-173. (In Russ.). https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-2-167-173. EDN: QPEWOW.

2. Kabaldin Yu.G., Sablin P.A., Schetinin V.S. Control of the dynamic stability of metal-cutting systems in the process of cutting based on the fractality of roughness of the machined surface. *Frontier Materials & Technologies*. 2023;3:43-51. (In Russ.). https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-3-65-4. EDN: PATDRX.

3. Bobrov V.F. Effect of tool main cutting edge inclination angle on metal cutting. Moscow: Mashgiz; 1962, 150 p. (In Russ.).

4. Bobrov V.F., Granovskij G.I., Zorev N.N., Isaev A.I., Klushin M.I., Larin M.N., et al. *Development of the science of cutting metals*. Moscow: Mashinostroenie; 1967, 416 p. (In Russ.). EDN: XVPBFT.

5. Bobrov V.F. Fundamentals of the theory of metal cutting.. Moscow: Mashinostroenie; 1975, 344 p. (In Russ.).

6. Wolf A.M. Metal cutting. Leningrad: Mashinostroenie; 1973, 496 p. (In Russ.).

7. Teleshevskij V.I., Sokolov V.A. Laser correction of geometric errors of multi-coordinate systems with software control. *Measurement technology*. 2012;5:33-37. (In Russ.).

8. Kuznetsov A.P. Thermal behavior and accuracy of metal-cutting machines. Moscow: Yanus-K; 2011, 255 p. (In Russ.).

9. Salnikov V.S., Shadsky G.V., Erzin O.A. Analysis of technical capabilities by kinematic angles of cutting wedge at turning. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science*. 2023;12:276-284. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-12-276-277. EDN: RVCVLJ.

10. Erzin O.A., Shadsky G.V., Shatalov D.D. Control of cutter kinematic angles depending on machined part profile. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science*. 2024;8:494-501. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-8-494-495. EDN: INPCGN.

11. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. The features of the evolution of the dynamic cutting system due to the regenerative effect. In: *Dynamics of technical systems: AIP Conference Proceedings of the 7 International Scientific-Technical Conference.* 9–11 September 2023, Rostov-on-Don. Rostov-on-Don: American Institute of Physics Inc.; 2023, vol. 2507, Iss. 1, p. 030002. https://doi.org/10.1063/5.0109559. EDN: FLSYFX.

12. Bezyazychnyj V.F. Similarity method in mechanical engineering technology. Moscow: Infra-Inzheneriya; 2021, 356 p. (In Russ.).

13. Salnikov V.S., Shadsky G.V., Erzin O.A. Analysis of the design solution of an intelligent cutting tool with a controlled front angle. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science.* 2022;10:400-406. (In Russ.). https://doi. org/10.24412/2071-6168-2022-10-400-406. EDN: IECIWG.

14. Shadsky G.V., Salnikov V.S., Erzin O.A. Analysis of technical capabilities by kinematic angles of cutting wedge at turning. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science.* 2019;12:360-367. (In Russ.). EDN: AZLAUI.

15. Shadsky G.V., Salnikov V.S., Erzin O.A. Prospects of control of kinematic angles of cutting wedge at turning operations. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science.* 2019;12:342-349. (In Russ.). EDN: PLHGSV.

16. Salnikov V.S., Shadsky G.V., Erzin O.A. Technical solution of a cutting turning tool with a controlled front angle. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science.* 2024;2:3-6. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-2-3-4. EDN: YTQRUQ.

17. Evseev L.L. Initial provisions and dependencies for calculating metal cutting dynamics characteristics. Russian Engineering Research. 1995;12:3-7. (In Russ.).

18. Evseev L.L. Calculating optimal cutting speed based on chip formation dynamic coefficient. *Machines and Tooling*. 1994;4:41-43. (In Russ.).

19. Volkov D.I., Proskuryakov S.L. Development of process models including cutting cycle formation CHIP. *Vestnik* UGATU. 2011;15(3):72-78. EDN: PWTNTV. (In Russ.).

20. Ryzhkin A.A., Klimov M.M., Sergeev R.V. Chip formation features during steel processing by hard alloys with wear-resistant coatings. *Vestnik of Don State Technical University*. 2001;1(1):47-53. (In Russ.). EDN: SXQCTB.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ерзин Олег Александрович,

. к.т.н.,

доцент кафедры «Промышленная автоматика и робототехника», Тульский государственный университет, 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, Россия © erzin79@mail.ru

Васин Сергей Александрович,

д.т.н., профессор, профессор-консультант кафедры «Технология машиностроения», Тульский государственный университет, 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, Россия vasin_sa53@mail.ru

https://ipolytech.elpub.ru ·

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleg A. Erzin,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Industrial Automation and Robotics,
Tula State University,
92, Lenina pr., Tula 300012, Russia
☑ erzin79@mail.ru

Sergey A. Vasin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor-Consultant of the Department of Mechanical Engineering Technology, Tula State University, 92, Lenina pr., Tula 300012, Russia vasin_sa53@mail.ru

2025. T. 29. № 1. C. 22-32 Polytech Journal

2025;29(1):22-32

Клентак Анна Сергеевна,

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

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 25.12.2024 г.; одобрена после рецензирования 02.02.2025 г.; принята к публикации 28.02.2025 г.

Anna S. Klentak,

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

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 25.12.2024; approved after reviewing 02.02.2025; accepted for publication 28.02.2025.

https://ipolytech.elpub.ru

ISSN 2782-6341 (online)

Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. 33-50 2025;29(1):33-50

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья УДК 621.311 EDN: LBGQWS DOI: 10.21285/1814-3520-2025-1-33-50



Анализ влияния скин-эффекта на активное сопротивление в проводах линий электропередачи

А.В. Белосветов¹, В.З. Манусов²

¹Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия ²Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

Резюме. Цель – анализ влияния скин-эффекта на активное сопротивление алюминиевых проводов с использованием математической модели, основанной на теории электромагнитного поля. В исследованиях применялась программа моделирования ELCUT, использующая метод конечных элементов. В качестве объекта моделирования были приняты провода: круглый алюминиевый и цилиндрический сталеалюминиевый сечением по 339 мм², а также провод марки AC 300/39. В работе было учтено, что реальная модель линии электропередачи является неоднородной, т.е. представляет собой проволочную конструкцию сталеалюминиевого провода. Верификация расчетов в используемой компьютерной программе осуществлялась через разбиение алюминиевого провода на две составляющие: круг сечением 39 мм² и внешнее кольцо сечением 300 мм². При оценке результатов моделирования алюминиевого провода на разных гармониках установлено совпадение полученных коэффициентов скин-эффекта с математической моделью (данный коэффициент отражает увеличение активного сопротивления провода на высшей гармонике по отношению к сопротивлению постоянному току). Для алюминиевого провода сечением 339 мм² активное сопротивление на 5-й гармонике увеличилось на 24%, на 7-й – на 40%, на 11-й - на 71% и на 13-й - на 84%. Это обстоятельство подтвердило необходимость учета скин-эффекта при оценке потерь электроэнергии в линиях электропередачи на высших гармониках. Авторами предложено рассматривать конструкцию провода марки АС в виде цилиндрического неоднородного провода, состоящего из стального круга внутри и полого алюминиевого круга снаружи. На примере провода АС 300/39 при определении коэффициента скин-эффекта данным способом погрешность не превышала 5% на исследуемом интервале гармоник. Таким образом, предложенный метод исследования, заключающийся в рассмотрении проводов марки АС как круглых цилиндрических, показывает возможность уточнения математической модели данных проводов.

Ключевые слова: активное сопротивление, скин-эффект, высшие гармоники, электромагнитная совместимость, потери электроэнергии

Благодарности. Работа выполнена с предоставлением авторам доступа к программе «ELCUT профессиональный» по заявке для выполнения учебной работы, отправленной в ООО «Тор», Санкт-Петербург.

Для цитирования: Белосветов А.В., Манусов В.З. Анализ влияния скин-эффекта на активное сопротивление в проводах линий электропередачи // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 1. С. 33–50. https://doi.org/ 10.21285/1814-3520-2025-1-33-50. EDN: LBGQWS.

POWER ENGINEERING

Original article

Skin effect and active resistance of power transmission line wires

Anton V. Belosvetov¹, Vadim Z. Manusov²

¹Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia ²Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

Abstract. The study aims to analyze the skin effect as applied to the active resistance of aluminum wires using a mathematical model based on the theory of electromagnetic fields. The study uses the Elcut finite element simulation software. The simulated object includes round aluminum and cylindrical steel-aluminum wires with a cross-section of 339 mm² each, as well as AS 300/39 wire. The nonuniformity of a real power transmission line with steel-aluminum wires is considered. Calculations were verified in the Elcut software by dividing the aluminum wire into two components: a circle with a cross-section of 39 mm² and an outer ring with a cross-section of 300 mm². The results of aluminum wire simulation at different harmonics have established a coincidence of the obtained skin effect coefficients with the mathematical model. This coefficient reflects an increase in the active resistance of the

2025:29(1):33-50

ISSN 2782-6341 (online)

wire at the highest harmonic in relation to direct current resistance. For an aluminum wire with a cross-section of 339 mm², the active resistance at the 5th, 7th,11th, and 13th harmonic has increased by 24, 40, 71, and 84%, respectively. This circumstance confirmed the need to consider the skin effect in the assessment of power losses in power transmission lines at higher harmonics. We propose to simulate the AS wire as a cylindrical nonuniform wire consisting of a steel circle inside an aluminum ring. For AS 300/39 wire, the error of determining the skin effect coefficient using this method is below 5% in the studied harmonic range. Thus, the proposed research method considering AS wires as round cylindrical shows the possibility of refining their mathematical model.

Keywords: active resistance, skin effect, higher harmonics, electromagnetic compatibility, power losses

Acknowledgements. The work has been conducted with the author's access to the ELCUT Pro software upon the request for academic work sent to Tor Ltd, St. Petersburg.

For citation: Belosvetov A.V., Manusov V.Z. Skin effect and active resistance of power transmission line wires. *iPolytech Journal.* 2025;29(1):33-50. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-33-50. EDN: LBGQWS.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время интерес к влиянию высших гармонических составляющих переменного тока возрастает. Ранее влияние высших гармоник (ВГ) было характерно для сетей низкого напряжения. На сегодняшний день развитие электрических систем идет по пути подключения множества крупных нелинейных нагрузок на уровнях среднего и высокого напряжения [1]. В электроэнергетических системах России характерно наличие мощных нелинейных нагрузок, подключенных на разных ступенях напряжения передачи и распределения электроэнергии, что и порождает возникновение ВГ в высоковольтных электрических сетях [2].

Нагрузками такого рода являются системы тягового электроснабжения (СТЭ), получающие энергию от систем внешнего электроснабжения (СВЭ) напряжением 110–220 кВ [З]. При питании СТЭ по линиям электропередачи (ЛЭП) значительной протяженности возникают резонансные явления, оказывающие негативное влияние как на тяговую сеть, так и на систему внешнего электроснабжения.

Так, например, в [4] описано влияние предприятий тяжелой промышленности по добыче угля на формирование гармоник и интергармоник. Это обусловлено тем, что на горно-перерабатывающих предприятиях России в основном используются тиристорные преобразователи напряжения и преобразователи частоты мощностью до 750 кВт [5], снижающие затраты на переработку руды, но вызывающие появление высших гармоник и импульсных перенапряжений [6–9].

Влияние распределенной генерации (РГ) на формирование высших гармоник, выдаваемых в локальную сеть, представлено в [10], где отдельно приведена связь резонанса на частотах гармоник с интеграцией РГ в сеть, включая результаты моделирования [11, 12].

Рост числа и мощности нелинейных нагрузок, порождающих гармонические составляющие в энергосистеме, ведет к ухудшению показателей качества электроэнергии (ПКЭЭ) [13]. Несоответствие ПКЭЭ требованиям ГОСТ 32144-2013³ приводит к сокращению срока службы электрооборудования и преждевременному выходу его из строя, что наносит существенный экономический ущерб для энергосистемы [14, 15]. Наряду с этим отрицательное влияние токов высших гармоник на воздушные линии (ВЛ) электропередачи высокого напряжения заключается в увеличении потерь электроэнергии или так называемых добавочных потерь, что также ухудшает технико-экономические показатели и энергоэффективность электроэнергетических систем⁴.

По результатам инструментальных обследований [16], приведенных за 2011–2012 гг., потери электроэнергии от несинусоидальности токов в воздушных линиях в среднем составляли порядка 2–2,5%, а в отдельных случаях [17] за 2009–2010 гг. они достигали 25% [18–22]. В настоящее время доля потерь от высших гармоник продолжает расти, в связи с чем их расчет и оценка являются актуальной задачей.

³ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014.

⁴Power System Harmonics Causes and Effects of Variable Frequency Drives Relative to the IEEE 519-1992 Standard. Режим доступа: https://igate.alamedaelectric.com/Modicon%20Documents/AC%20Drive%20Power%20System%20Harmonics.pdf (дата обращения: 28.09.2024).

Белосветов А.В., Манусов В.З. Анализ влияния скин-эффекта на активное сопротивление в проводах линий... Belosvetov A.V., Manusov V.Z. Skin effect and active resistance of power transmission line wires

Для выявления природы возникновения потерь от высших гармоник необходимо уточнить математические модели всех элементов электрических сетей, и, в первую очередь, модель линий электропередачи с учетом скин-эффекта на высших гармониках. С физической точки зрения, скин-эффект заключается в неравномерном распределении плотности электрического тока по поперечному сечению проводника. Иначе говоря, электрический ток в проводниках вытесняется от центра ближе к поверхности, причем данный эффект проявляется сильнее при увеличении частоты протекающего тока. В работах [23–25] авторы подробно изучают скин-эффект для сплошных круглых проводников, обычно используемых в системах распределения электроэнергии, однако там не рассматриваются сталеалюминиевые провода (неоднородные), а также провода с проволочной структурой, например, марки АС. В [26] анализируют влияние скин-эффекта на индуктивное сопротивление проводов ВЛ, но в работе нет упоминания об изменении активного сопротивления, которое в данном случае больше подвержено влиянию высших гармоник из-за скин-эффекта.

В настоящее время единые и стандартизированные модели, учитывающие влияние скин-эффекта на провода ВЛ, недостаточно изучены. Таким образом, разработка математической модели, адекватно отражающей процесс вытеснения тока к поверхности проводника, является весьма актуальной задачей. Отсюда возникает необходимость улучшения модели, позволяющей более достоверно определять коэффициент увеличения активного сопротивления проводов ВЛ $k_v(f)$ – отношение активного сопротивления на *v*-й гармонике $R_v(f)$ к омическому сопротивлению R_0 (сопротивлению проводника постоянному току).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭФФЕКТА ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКА

Математическое описание скин-эффекта при протекании переменного тока по проводнику круглого сечения удобно представлять в цилиндрической системе координат (ЦСК) *r*, *z* и θ , совместив ось *OZ* с осью провода (рис. 1). Конструкцию сплошного круглого проводника характеризуют через радиус, который в ЦСК принимает значение *r* = *R*, м. В то время как его длина – *z* = *L*, м. Длину окружности (поверхность проводника) и площадь поперечного сечения описывают через угол θ . При этом полагаем, что обратный провод находится настолько далеко, что влиянием переменного магнитного потока, вызванного током в нем, на распределение тока в исследуемом проводе можно пренебречь⁵.



Рис. 1. Представление сплошного круглого провода в цилиндрической системе координат **Fig. 1.** Representation of a solid round wire in a cylindrical coordinate system

Математическое представление явления скин-эффекта основано на теории электромагнитного поля⁶. Из нее следуют два уравнения, называемые линейными дифференциальными уравнениями для комплексных амплитуд плотности тока *J* и напряженности магнитного поля *H*.

⁵Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники. Часть З. Теория электромагнитного поля: учебник. 5-е изд., перераб. М.: Госэнергоиздат, 1959. 232 с.

⁶Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: учебник. Т. З; 4-е изд. СПб.: Питер, 2003. 377 с.
2025. T. 29. № 1. C. 33-50 2025;29(1):33-50

iPolytech Journal

ISSN 2782-6341 (online)

$$\frac{d^2 \dot{J}_m}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d \dot{J}_m}{dr} = j \omega \mu \gamma \dot{J}_m; \qquad (1)$$

$$\frac{d^2\dot{H}_m}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{d\dot{H}_m}{dr} - \frac{\dot{H}_m}{r^2} = j\omega\mu\gamma\dot{H}_m.$$
(2)

После введения новой переменной $x = r \sqrt{-j\omega\mu\gamma}$ уравнения (1), (2) приводятся к более простому виду:

$$\frac{d^{2}\dot{J}_{m}}{dx^{2}} + \frac{1}{x}\frac{d\dot{J}_{m}}{dx} + \dot{J}_{m} = 0; \qquad (3)$$

$$\frac{d^{2}\dot{H}_{m}}{dx^{2}} + \frac{1}{x}\frac{d\dot{H}_{m}}{dx} + \left(1 - \frac{1}{x^{2}}\right)\dot{H}_{m} = 0.$$
(4)

Уравнения (3), (4) являются частными случаями уравнения Бесселя:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{1}{x}\frac{dy}{dx} + \left(1 - \frac{n^2}{x^2}\right)y = 0.$$
(5)

Функции, удовлетворяющие уравнению Бесселя, называются функциями Бесселя [27, 28], общий интеграл которых выглядит следующим образом:

$$y = AJ_n(x) + BN_n(x), \tag{6}$$

где A и B – произвольные постоянные; $J_n(x)$ – функция Бесселя первого рода порядка n; $N_n(x)$ – функция Бесселя второго рода порядка n.

При *n* = 0 получаем уравнение для плотности тока, при *n* = 1 – соответственно, для напряженности магнитного поля. Общие интегралы этих уравнений могут быть представлены в следующем виде:

$$J_{m} = A_{0}J_{0}(x) + B_{0}N_{0}(x);$$
(7)

$$\dot{H}_m = A_1 J_1(x) + B_1 N_1(x),$$
 (8)

где $J_0(x)$ и $N_0(x)$ – функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка; $J_1(x)$ и $N_1(x)$ – функции Бесселя первого и второго рода первого порядка.

Так как, опираясь на труды Л.Р. Неймана⁵, К.С. Демирчяна⁶ и других авторов, на оси провода величины J_m и H_m не могут иметь бесконечно большие значения, то $B_0 = 0$ и $B_1 = 0$. Тогда уравнения (7) и (8) принимают следующий вид:

$$\dot{J}_{m} = A_{0}J_{0}(x);$$
 (9)

$$\dot{H}_m = A_1 J_1(x). \tag{10}$$

Из [29, 30] решение уравнения Бесселя – единственное с точностью до константы путем разложения в ряд⁷:

$$J_n(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \left(\frac{x}{2}\right)^{2^{k+1}}}{k!(n+k)!}, \ n \ge 0.$$
(11)

При подстановке в уравнение (5) $x = x\sqrt{-j}$ общее решение имеет следующий вид:

$$y = AJ_n\left(x\sqrt{-j}\right). \tag{12}$$

⁷Садовой В.Д. Дифференциальное уравнение Бесселя: учеб. пособ. 2 изд., испр. и доп. М.: Московский автомобильнодорожный гос. тех. ун-т, 2019. 100 с.

Belosvetov A.V., Manusov V.Z. Skin effect and active resistance of power transmission line wires

Решением уравнения (12) является ряд с мнимым аргументом $x\sqrt{-j}$:

$$J_n\left(x\sqrt{-j}\right) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \left(\frac{x\sqrt{-j}}{2}\right)^{2k+n}}{k!(n+k)!}, \ n \ge 0.$$
(13)

При *n* = 0 имеем

$$J_{0}\left(x\sqrt{-j}\right) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k} \left(\frac{x\sqrt{-j}}{2}\right)^{2k+0}}{k!(0+k)!} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k} \left(\frac{x\sqrt{-j}}{2}\right)^{2k}}{(k!)^{2}} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k} \cdot \left(\sqrt{-j}\right)^{2k}}{(k!)^{2}} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k} \cdot \left(-j\right)^{k}}{(k!)^{2}} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{j^{k} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k}}{(k!)^{2}}.$$
(14)

В результате получим комплексный знакопеременный ряд:

$$J_{0}\left(x\sqrt{-j}\right) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{j^{k}\left(\frac{x}{2}\right)^{2k}}{\left(k!\right)^{2}} = 1 + j\frac{\left(\frac{x}{2}\right)^{2}}{\left(1!\right)^{2}} - \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^{4}}{\left(2!\right)^{2}} - j\frac{\left(\frac{x}{2}\right)^{6}}{\left(3!\right)^{2}} + \dots$$
(15)

Отделив действительную часть от мнимой, получаем

$$J_{0}\left(x\sqrt{-j}\right) = \left[1 - \frac{1}{(2!)^{2}}\left(\frac{x}{2}\right)^{4} + \frac{1}{(4!)^{2}}\left(\frac{x}{2}\right)^{8} - \frac{1}{(6!)^{2}}\left(\frac{x}{2}\right)^{12} + \dots\right] + j\left[\frac{1}{(1!)^{2}}\left(\frac{x}{2}\right)^{2} - \frac{1}{(3!)^{2}}\left(\frac{x}{2}\right)^{6} + \frac{1}{(5!)^{2}}\left(\frac{x}{2}\right)^{10} - \frac{1}{(7!)^{2}}\left(\frac{x}{2}\right)^{14} + \dots\right].$$
(16)

Уравнение (16) удобно записывать в виде

$$J_0\left(x\sqrt{-j}\right) = \operatorname{ber}_0(x) + j\operatorname{bei}_0(x), \qquad (17)$$

где

$$\operatorname{ber}_{0}(x) = 1 - \frac{1}{(2!)^{2}} \left(\frac{x}{2}\right)^{4} + \frac{1}{(4!)^{2}} \left(\frac{x}{2}\right)^{8} - \frac{1}{(6!)^{2}} \left(\frac{x}{2}\right)^{12} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k}}{\left((2k)!\right)^{2}} \left(\frac{x}{2}\right)^{4k};$$
(18)

$$bei_{0}(x) = \frac{1}{(1!)^{2}} \left(\frac{x}{2}\right)^{2} - \frac{1}{(3!)^{2}} \left(\frac{x}{2}\right)^{6} + \frac{1}{(5!)^{2}} \left(\frac{x}{2}\right)^{10} - \frac{1}{(7!)^{2}} \left(\frac{x}{2}\right)^{14} + \dots =$$
$$= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k}}{\left((2k+1)!\right)^{2}} \left(\frac{x}{2}\right)^{4k+2}.$$
(19)

Функции ber₀(x) (Bessel reelle – Бесселя вещественные) и bei₀(x) (Bessel imaginaire – Бесселя мнимые) представляют собой так называемые функции Бесселя, связанные с функцией $J_0(x\sqrt{-j})$.

Выражение (17) в показательной форме имеет следующий вид:

$$J_0(x\sqrt{-j}) = ber_0(x) + jbei_0(x) = b_0(x)e^{j\beta_0(x)},$$
(20)

где *b*₀(*x*) – модуль функции Бесселя

$$b_0(x) = \sqrt{ber_0^2(x) + bei_0^2(x)};$$
 (21)

https://ipolytech.elpub.ru -

37

Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 33-50 2025:29(1):33-50

β₀(*x*) – аргумент функции Бесселя

$$\beta_0(x) = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{bei}_0(x)}{\operatorname{ber}_0(x)}\right).$$
(22)

Аналогичным образом задача может быть решена при подстановке *n* = 1 в уравнение (13), в итоге получаем

$$J_1\left(x\sqrt{-j}\right) = \sqrt{-j} \cdot \left(\operatorname{ber}_1(x) + j\operatorname{bei}_1(x)\right), \tag{23}$$

где

$$\operatorname{ber}_{1}(x) = \frac{1}{0! \cdot 1!} \left(\frac{x}{2}\right)^{1} - \frac{1}{2! \cdot 3!} \left(\frac{x}{2}\right)^{5} + \frac{1}{4! \cdot 5!} \left(\frac{x}{2}\right)^{9} - \frac{1}{6! \cdot 7!} \left(\frac{x}{2}\right)^{13} + \dots = \\ = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k}}{(2k)! (2k+1)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{4k+1};$$
(24)

$$bei_{1}(x) = \frac{1}{1! \cdot 2!} \left(\frac{x}{2}\right)^{3} - \frac{1}{3! \cdot 4!} \left(\frac{x}{2}\right)^{7} + \frac{1}{5! \cdot 6!} \left(\frac{x}{2}\right)^{11} - \frac{1}{7! \cdot 8!} \left(\frac{x}{2}\right)^{15} + \dots =$$
$$= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k}}{(2k+1)! (2k+2)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{4k+3}.$$
(25)

Уравнение (23) в показательной форме принимает следующий вид:

$$J_1\left(x\sqrt{-j}\right) = 1 \cdot M_1(x) \cdot e^{j\left(\theta_1(x) - \frac{\pi}{4}\right)} = b_1(x)e^{j\beta_1(x)}, \qquad (26)$$

где $b_1(x)$ – модуль функции Бесселя

$$b_{1}(x) = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^{2} + \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^{2}} \cdot \sqrt{\operatorname{ber}_{1}^{2}(x) + \operatorname{bei}_{1}^{2}(x)} = \sqrt{\operatorname{ber}_{1}^{2}(x) + \operatorname{bei}_{1}^{2}(x)}; \quad (27)$$

β₁(x) – аргумент функции Бесселя

$$\beta_1(x) = \theta_1(x) - \frac{\pi}{4} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{bei}_1(x)}{\operatorname{ber}_1(x)}\right) - \frac{\pi}{4}.$$
(28)

Как показывают уравнения (18), (19), (23), (24), модули и аргументы функций Бесселя, получаемые в уравнениях (21), (22), (26), (27), – числа действительные. Следовательно, для их определения при анализе скин-эффекта проводника достаточно определить переменную $x = R\sqrt{\omega\mu\gamma}$, где R – радиус проводника, м; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, рад; f – частота электрического тока, протекающего через проводник, Гц; μ – абсолютная магнитная проницаемость проводника, Гн/м; γ – удельная проводимость, См/м.

Используя соотношение для провода круглого сечения, приведенное в трудах Л.Р. Неймана⁵, К.С. Демирчяна⁶ и других авторов, после подстановки $x = R \sqrt{\omega \mu \gamma}$ получим отношение комплексного сопротивления к омическому сопротивлению проводника:

$$\frac{Z_{\text{внутр}}}{r_0} = \frac{|\mathbf{z}|_{\text{внутр}}}{r_0} \cdot \mathbf{e}^{j\varphi} = \frac{\mathbf{x}}{2} \cdot \frac{\mathbf{b}_0(\mathbf{x})}{\mathbf{b}_1(\mathbf{x})} \cdot \mathbf{e}^{j\left(\beta_0(\mathbf{x}) - \beta_1(\mathbf{x}) - \frac{\pi}{4}\right)},\tag{29}$$

при этом $\varphi = \beta_0(x) - \beta_1(x) - \frac{\pi}{4}$ – угол, на который запаздывает по фазе напряженность магнитного поля относительно напряженности электрического поля на поверхности провода;

 $|z|_{\text{внутр}}$ – модуль комплексного сопротивления проводника равен $\sqrt{r_{\text{внутр}}^2 + x_{\text{внутр}}^2}$; $b_0(x)$, $b_1(x)$, $\beta_0(x)$, $\beta_1(x)$ – модули и аргументы функций Бесселя первого рода нулевого и первого порядков комплексных чисел $J_0(x)$ и $J_1(x)$ на поверхности провода.

Выразив действительную часть в уравнении (28), получим коэффициенты увеличения активного сопротивления *r* к сопротивлению постоянному току *r*₀ для разных частот:

$$k_{v}(f) = \frac{r}{r_{0}} = \frac{x}{2} \cdot \frac{b_{0}(x)}{b_{1}(x)} \cdot \cos\left(\beta_{0}(x) - \beta_{1}(x) - 45^{\circ}\right).$$
(30)

Таким образом, оценка влияния скин-эффекта на проводники сводится к определению модулей и аргументов функций Бесселя первого рода нулевого и первого порядков $b_0(x)$, $\beta_0(x)$, $\beta_1(x)$, $\beta_1(x)$.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования влияния скин-эффекта проводились в программе моделирования ELCUT методом конечных элементов.

Первоначально рассмотрено влияние скин-эффекта на провод АС 300/39 без учета проволочной конструкции и неоднородной (сталеалюминиевой) структуры. Конструктивно данный провод представляет собой алюминиевый круг сечением 339 мм², геометрия которого описана в программе двумя способами.

На первоначальном этапе рассмотрено влияние скин-эффекта на проводник, аналогичный проводу АС 300/39 без учета проволочной и неоднородной структуры. Ниже представлено моделирование сплошного алюминиевого проводника сечением 339 мм² круглой формы в виде двух конструкций:

- круг сечением 339 мм², приведенный на рис. 2 а;

однородный проводник, состоящий из круга 39 мм² и внешнего кольца (полый проводник) сечением 300 мм², приведенный на рис. 2 *b*.



Рис. 2. Поперечное сечение сплошного алюминиевого проводника: а – круг сечением 339 мм²; b – круглый составной проводник

Fig. 2. Cross-section of a solid aluminium conductor: a – circle with the cross-section of 339 mm²; b – round composite conductor

На рис. З *а* приведена схема электрической цепи для сплошного алюминиевого проводника сечением 339 мм². На рис. З *b* представлена схема электрической цепи для составного проводника, при этом внешнее кольцо сечением 300 мм² имеет сопротивление R_1 , а внутренний круг сечением 39 мм² – R_2 . Стоит оговорить заранее, что ток из внешнего кольца не перетекает во внутренний круг, и наоборот. Постановка задачи требует рассматривать составной провод как два проводника, подключенных параллельно к источнику электродвижущей силы (ЭДС). ЭДС выдает среднеквадратическое значение переменного напряжения |U| = 1 B (1 VAC – от англ. Volts alternating current – напряжение переменноготока) различной частоты, приложенное к исследуемым проводникам.



2025. T. 29. № 1. C. 33-50

2025;29(1):33-50

Polytech Journal

Рис. 3. Схема электрической цепи для расчета алюминиевого проводника: а – круг сечением 339 мм²; b – круглый составной проводник

Fig. 3. Electrical circuit diagram for aluminium conductor calculation: a – circle with the cross section of 339 mm²; b – round composite conductor

Сопротивлением, приведенным на рис. З, является сам проводник, длина которого *L* = 50 м. Это обусловлено тем, что проводник сам является ограничителем тока *|I|*, величина которого не превышает длительно допустимого значения для провода данной конструкции.

Результат моделирования в виде значения тока |/| и фазы φ₁ приведен к виду, удобному для сравнения с математической (эталонной) моделью скин-эффекта по формуле ниже:

$$R(f) = \frac{1}{|I(f)|} \times \cos(-\varphi_{I(f)}).$$
(31)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЛОШНОГО АЛЮМИНИЕВОГО ПРОВОДА

На рис. 4 *a*-*d* представлены результаты моделирования в виде спектрограмм распределения плотности тока по поперечному сечению проводов для различных частот, где видно, что на границах поверхности плотность тока не меняется, в то время как середина провода разгружается. Для обоих конструкций распределение плотности тока получилось одинаковым, поскольку составной проводник представляет собой сплошной провод сечением 339 мм².



Рис. 4. Спектрограмма распределения тока по поперечному сечению алюминиевого провода: а – на частоте 50 Гц; b – на частоте 200 Гц; с – на частоте 400 Гц; d – на частоте 800 Гц

Fig. 4. Spectrogram of current distribution through the aluminium wire cross-section: a – at the frequency of 50 Hz; b – at the frequency of 200 Hz; c – at the frequency of 400 Hz; d – at the frequency of 800 Hz

Белосветов А.В., Манусов В.З. Анализ влияния скин-эффекта на активное сопротивление в проводах линий... Belosvetov A.V., Manusov V.Z. Skin effect and active resistance of power transmission line wires



Рис. 5. Распределение плотности тока через поперечное сечение проводника на различных частотах **Fig. 5.** Current density distribution through the conductor cross-section at different frequencies

Рис. 5 численно отображает уменьшение плотности тока при приближении к центру проводника на разных частотах, однако наибольший интерес привлекает кривая, полученная на частоте 800 Гц. При убывании от периферии проводника на расстояние $\delta \approx 3,644$ мм плотность тока уменьшается в е раз и становится равной j_0/e . Величина δ называется глубиной скин-слоя.

Пример численных результатов моделирования сплошного алюминиевого проводника сечением 339 мм² для нескольких частот сведен в табл. 1. Суммарный ток, протекающий через составной проводник (см. рис. 2 *b*), равен току, протекающему через сплошной алюминиевый проводник в форме круга (см. рис. 2 *a*), и это справедливо для любой частоты *f* прикладываемого напряжения. Наличие угла φ_1 говорит о смещении тока относительно прикладываемого к краям проводника напряжения |U| = 1 В (см. рис. 3), более этого, данное смещение стремится к -45° при увеличении частоты.

Частота <i>f</i> , Гц	Круглый составной проводник							Круг сечением	
	Кольцо 300 мм ²		Круг 39 мм ²		Составной провод 339 мм ²		339 мм ²		
	<i>1</i> , A	φ ₁ , °	<i>1</i> , A	φ ₁ , °	<i>1</i> , A	φ _ι , °	<i>1</i> , A	φ ₁ , °	
0	212,280	0	27,597	0	239,880	0	239,880	0	
50	206,890	-9,266	26,666	-20,020	233,140	-10,489	233,140	-10,489	
200	162,510	-26,764	18,671	-67,698	177,040	-30,727	177,040	-30,727	
400	123,850	-33,354	10,935	-106,540	127,440	-38,065	127,440	-38,065	
800	93,105	-37,650	4,767	-155,560	90,971	-40,304	90,971	-40,304	

Таблица 1. Результаты моделирования алюминиевых проводов в программе ELCUT Table 1. Simulation results of aluminium wires in ELCUT software

По выражению (30) определены активные сопротивления провода для различных частот. Например, на частоте 0 Гц (при постоянном токе) $R(0) = (1/239,880) \cdot \cos(0^{\circ}) = 4,169 \cdot 10^{-3}$ Ом, в то время как на частоте 800 Гц $R(800) = (1/90,971) \cdot \cos(40,304^{\circ}) = 8,383 \cdot 10^{-3}$ Ом. Применив уравнение (29), были получены коэффициенты увеличения активного сопротивления $k_v(f)$, а также пересчитаны сопротивления r_0 на единицу длины (погонные сопротивления) для гармоник от 0 до 20. При определении погонного активного сопротивления следует помнить, что длина моделируемого проводника задана L = 50 м. 2025;29(1):33-50

ISSN 2782-6341 (online)

Результаты данных, полученных при моделировании сплошного алюминиевого провода сечением 339 мм², и расчеты по эталонной модели сведены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты увеличения активного сопротивления *k*_v(*f*) и погонные сопротивления *r*₀ сплошного алюминиевого провода сечением 339 мм² на различных гармониках

Table 2. Coefficients of increase of active resistance $k_v(f)$ and resistances per unit length r_0 of a solid aluminium wire with the cross-section of 339 mm² at different harmonics

lloororo		Математическая	Модели	рование	Моделирование составного	
f Fu	Гармоника v	модель	сплошн	ого круга	провода	
1,14		<i>k</i> _v (<i>f</i>), o.e.	<i>г</i> ₀, Ом∕км	<i>k</i> _v (<i>f</i>), o.e.	<i>г</i> ₀, Ом∕км	<i>k</i> _v (<i>f</i>), o.e.
0 (DC)	0	1	0,083	1	0,083	1
50	1	1,012	0,084	1,012	0,084	1,012
100	2	1,046	0,087	1,046	0,087	1,046
150	3	1,098	0,092	1,098	0,092	1,098
200	4	1,165	0,097	1,165	0,097	1,165
250	5	1,240	0,103	1,240	0,103	1,240
300	6	1,320	0,110	1,320	0,110	1,320
350	7	1,402	0,117	1,402	0,117	1,402
400	8	1,482	0,124	1,482	0,124	1,482
450	9	1,560	0,130	1,560	0,130	1,560
500	10	1,634	0,136	1,634	0,136	1,634
550	11	1,705	0,142	1,705	0,142	1,705
600	12	1,772	0,148	1,772	0,148	1,772
650	13	1,836	0,153	1,836	0,153	1,836
700	14	1,897	0,158	1,897	0,158	1,897
800	16	2,011	0,168	2,011	0,168	2,011
900	18	2,117	0,176	2,117	0,176	2,117
1000	20	2,216	0,185	2,216	0,185	2,216

Резюмируя данные из табл. 2, на высших гармониках возрастает активное сопротивление проводника по отношению к омическому сопротивлению: на 5-й гармонике увеличение составляет 24%, на 7-й – 40%, на 11-й – 71% и на 13-й – 84%. Это обстоятельно говорит о необходимости учета скин-эффекта при оценке «добавочных потерь» в проводнике от высших гармоник.

Относительная погрешность моделирования сплошного алюминиевого провода сечением 339 мм² в сравнении с математической моделью приведена на рис. 6 *a*, в то время как для составного провода данный показатель представлен на рис. 6 *b*. Таким образом, разница между расчетами с применением дифференциальных уравнений Бесселя и программным моделированием составила менее 0,004%, что обусловлено погрешностью метода конечных элементов при задании начальных настроек для расчета рассмотренных моделей проводов.



Рис. 6. Погрешность результатов моделирования по отношению к математической модели: а – сплошной алюминиевый провод сечением 339 мм²; b – составной алюминиевый провод

Fig. 6. Error of simulation results in relation to the mathematical model: a – solid aluminium wire with the cross section of 339 mm²; b – composite aluminium wire

Подводя итог, в результате моделирования сплошного алюминиевого провода сечением 339 мм² в виде составного (см. рис. 2 *b*) доказана состоятельность оценки влияния скин-эффекта на проводники методом конечных элементов. На основании этого предлагается рассматривать влияние скин-эффекта на сталеалюминиевые провода ВЛ с использованием схемы электрической цепи (см. рис. 3 *b*) без учета скрутки проволок между собой на первоначальном этапе. Кроме того, модель, учитывающая явление эффекта вытеснения тока в проводах ВЛ, предполагает пренебрежение эффектом близости, поскольку расстояние между самими проводами значительно превышает диаметр проводника [31].

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЛЕАЛЮМИНИЕВОГО ПРОВОДА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Результаты моделирования круглого неоднородного провода представлены на рис. 7 *a*-*d* в виде спектрограмм распределения плотности тока по поперечному сечению.

Согласно схеме электрической цепи (см. рис. 3 *b*) и выводам, приведенным ранее, проведено моделирование провода марки АС 300/39, рассматриваемого в виде двух конструкций:

 неоднородный проводник, состоящий из стального круга 39 мм² и внешнего алюминиевого кольца сечением 300 мм² (рис. 2 *b*);

- проволочная конструкция провода (рис. 8).

На рис. 8 *a*-*d* (аналогично рис. 7 *a*-*d*) приведены результаты моделирования провода AC 300/39. На рис. 9 численно отображено распределение плотности тока по поперечному сечению круглого сталеалюминиевого провода, где наблюдается перепад плотности тока на границе между сталью и алюминием. Рис. 10 иллюстрирует перепады плотности тока по поперечному сечению провода AC 300/39 в соответствии с линией разреза провода (рис. 8).

Численные результаты моделирования круглого сталеалюминиевого провода представлены в табл. 3, для провода АС 300/39 – в табл. 4. На высших гармониках смещение угла



Рис. 7. Спектрограмма распределения тока по поперечному сечению неоднородного сталеалюминиевого провода: а – на частоте 50 Гц; b – 200 Гц; c – 400 Гц; d – 800 Гц

Fig. 7. Spectrogram of current distribution through the cross section of an inhomogeneous steel-aluminium wire: a – at the frequency of 50 Hz; b – 200 Hz; c – 400 Hz; d – 800 Hz



Рис. 8. Спектрограмма распределения тока по поперечному сечению провода АС 300/39: а – на частоте 50 Гц; b – 200 Гц; с – 400 Гц; d – 800 Гц

Fig. 8. Spectrogram of current distribution through the cross-section of the 300/39 steel-aluminium wire: a – at the frequency of 50 Hz; b – 200 Hz; c – 400 Hz; d – 800 Hz

протекающего тока φ₁ стремится к -45° для круглого неоднородного провода, однако для провода AC 300/39 это смещение продолжает увеличиваться за счет наличия диэлектрической среды. Это обстоятельство не оказывает влияния на активное сопротивление провода, рассматриваемое в данной работе.



Рис. 9. Распределение плотности тока через поперечное сечение неоднородного сталеалюминиевого проводника на различных частотах

Fig. 9. Current density distribution through the cross section of an inhomogeneous steel-aluminium conductor at different frequencies

Белосветов А.В., Манусов В.З. Анализ влияния скин-эффекта на активное сопротивление в проводах линий... Belosvetov A.V., Manusov V.Z. Skin effect and active resistance of power transmission line wires



Рис. 10. Распределение плотности тока через поперечное сечение AC 300/39 на различных частотах **Fig. 10.** Current density distribution through the 300/39 steel-aluminium wire cross-section at different frequencies

	Сплошной неоднородный сталеалюминиевый проводник								
Частота <i>f</i> , Гц	Алюминий (кольцо 300 мм²)		Сталь (круг 39 мм²)		Неоднородный провод 339 мм ²				
	/ , A	φı, °	/ , A	φ ₁ , °	<i>1</i> , A	φı, °			
0	212,280	0	5,652	0	217,940	0			
50	208,920	-7,723	1,752	-54,996	210,120	-8,074			
200	176,180	-25,804	0,735	-92,860	176,470	-26,023			
400	132,570	-36,650	0,360	-126,360	132,580	-36,806			
800	91,761	-40,968	0,136	-168,480	91,678	-41,036			
1200	75,086	-41,438	0,068	-199,050	75,023	-41,458			
1600	65,571	-41,763	0,039	-224,630	65,532	-41,761			
2000	59,037	-42,098	0,024	-247,120	59,015	-42,088			

Таблица 3. Результаты моделирования неоднородного сталеалюминиевого проводника **Table 3.** Simulation results of the inhomogeneous steel-aluminium wire

Таблица 4. Результаты моделирования провода AC 300/39 в программе ELCUT Table 4. Simulation results of the 300/39 steel-aluminium wire in ELCUT software

	Провод марки АС 300/39								
Частота <i>f</i> , Гц	Алюминий (300 мм²)		Ст (39	а∧ь мм²)	AC 300/39				
	/ , A	φ ₁ , °	/ , A	φ ₁ , °	<i>1</i> , A	φ ₁ , °			
0	213,411	0	5,595	0	219,006	0			
50	209,280	-8,513	3,567	-53,127	211,834	-9,191			
200	173,540	-27,874	1,265	-100,002	173,932	-28,271			
400	128,730	-39,442	0,577	-133,870	128,687	-39,698			
800	87,918	-45,285	0,203	-175,800	87,786	-45,386			
1200	70,695	-47,307	0,097	-206,010	70,605	-47,336			
1600	60,467	-48,835	0,054	-231,040	60,414	-48,833			
2000	53,328	-50,038	0,032	-252,840	53,298	-50,025			

Polytech Journal

2025;29(1):33-50

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Увеличение активного сопротивления, выраженное через $k_v(f)$ для сплошного алюминиевого провода сечением 339 мм² (см. рис. 2 *a*), круглого неоднородного сталеалюминиевого провода (см. рис. 2 *b*) и провода марки АС 300/39 проиллюстрировано в табл. 5.

Таблица 5. Сравнительная оценка $k_v(f)$ сплошного алюминиевого провода сечением 339 мм², круглого неоднородного сталеалюминиевого провода и провода AC 300/39 на различных гармониках **Table 5.** Comparative estimation $k_v(f)$ of a 339 mm² solid aluminium wire, round inhomogeneous steel-aluminium wire and 300/39 steel-aluminium wire at different harmonics

Частота	F	Математическая	Модель неоднородного	Моделирование
f, Гц	тармоника <i>v</i>	модель	сталеалюминиевого проводника	AC 300/ 39
		κ _ν (<i>τ</i>), o.e.	<i>κ</i> _v (<i>t</i>), o.e.	<i>K</i> _v (<i>T</i>), o.e.
0 (DC)	0	1	1	1
50	1	1,012	1,027	1,021
100	2	1,046	1,046	1,044
150	3	1,098	1,073	1,073
200	4	1,165	1,110	1,109
250	5	1,240	1,154	1,152
300	6	1,320	1,203	1,201
350	7	1,402	1,258	1,254
400	8	1,482	1,316	1,309
450	9	1,560	1,376	1,367
500	10	1,634	1,438	1,424
550	11	1,705	1,500	1,482
600	12	1,772	1,561	1,539
650	13	1,836	1,621	1,595
700	14	1,897	1,680	1,649
800	16	2,011	1,793	1,752
900	18	2,117	1,899	1,849
1000	20	2,216	1,998	1,939

Влияние скин-эффекта на активное сопротивление сталеалюминиевых проводов выражено в меньшей степени в сравнении со сплошным алюминиевым проводом. Например, на 5-й гармонике увеличение составляет 15% относительно омического сопротивления, на 7-й – 25%.

Относительная погрешность математической модели сплошного алюминиевого провода сечением 339 мм² в сравнении с результатами моделирования провода AC 300/39 (рис. 11) превышает 5%, начиная с 4-й гармоники. Погрешность моделирования сплошного сталеалюминиевого провода (см. рис. 11) относительно модели AC 300/39 не превышает 4% на интервале гармоник от 0 до 40.





Выше было рассмотрено влияние скин-эффекта на активное сопротивление проводов различной конструкции при температуре 20°С в интервале гармоник, представляющих практический интерес. Отметим, что при нагреве провода действие скин-эффекта на его активное сопротивление ослабляется из-за уменьшения удельной проводимости (это отразится на переменной).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрено влияние скин-эффекта на увеличение активного сопротивления $k_v(f)$ сплошного алюминиевого провода в форме круга сечением 339 мм². По результатам моделирования проводника можно заключить, что увеличение частоты *f* источника ЭДС |*U*| (1 В) вызывает скин-эффект, который проявляется в понижении эффективного значения пропускаемого тока |*I*| через проводник (см. табл. 1). Этим явлением и обусловлено неравномерное распределение тока пропускаемого по сечению проводника (см. рис. 5), при повышении частоты. Таким образом, с повышением частоты увеличивается погонное активное сопротивление проводника *r*₀ (см. табл. 2).

Расчеты круглого алюминиевого провода сечением 339 мм², полученные при моделировании, совпадают с математической моделью, основанной на теории электромагнитного поля. Более того, моделирование методом конечных элементов раскрывает возможность анализа влияния скин-эффекта на сталеалюминиевые провода, что было подтверждено на примере провода AC 300/39.

Скин-эффект в проводах марки АС проявляется менее заметно в сравнении с конструкцией сплошного алюминиевого провода сечением, равным сумме алюминиевой и стальной частям провода ВЛ. При оценке аналитической моделью (формула (30) влияния скин-эффекта на активное сопротивление провода АС 300/39 погрешность, получаемая в расчетах, превысит 5%. Таким образом, необходимо уточнение математической модели проводов ВЛ, имеющих проволочную конструкцию.

На примере провода AC 300/39 доказана возможность рассмотрения данного провода в виде цилиндрического неоднородного провода, состоящего из круга внутри сечением 39 мм² и полого алюминия снаружи сечением 300 мм². Это подтверждено результатами исследований, в которых погрешность на исследуемом интервале гармоник не превышала 5%. Конструкцию других проводов марки AC для математического представления предлагается рассматривать аналогично.

Список источников

1. Levačić G., Župan A., Čurin M. An overview of harmonics in power transmission networks // First International Colloquium on Smart Grid Metrology. 2018. https://doi.org/10.23919/SMAGRIMET.2018.8369828.

2. Арриллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах / пер. с англ. Е.А. Васильчикова; под ред. Ю.С. Железко. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.

3. Шандрыгин Д.А., Довгун В.П., Егоров Д.Э., Маньшин М.В. Анализ резонансных режимов в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 396–407. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-396-407. EDN: MPFYPK.

4. Буй Нгок Хунг, Коверникова Л.И. Анализ возможности применения активных фильтров для снижения несинусоидальности напряжения в системе электроснабжения одного из угольных карьеров Вьетнама // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 318–332. https://doi.org/ 10.21285/1814-3520-2020-2-318-332. EDN: KCTRQU.

5. Пантелеев В.И., Кузьмин И.С., Завалов А.А., Тихонов А.В., Умецкая Е.В. Качество электрической энергии в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий России // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 3. С. 356–368. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-356-368. EDN: SRSSJA.

6. Бебихов Ю.В., Егоров А.Н., Матул Г.А., Семенов А.С., Харитонов Я.С. Поиск путей повышения эффективности применения высоковольтного частотно-регулируемого электропривода в условиях горного производства // Естественные и технические науки. 2018. № 8. С. 228–234. EDN: XYUMDB.

7. Ashraf N., Abbas G., Abbassi R., Jerbi H. Power quality analysis of the output voltage of AC voltage and frequency controllers realized with various voltage control techniques // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 2. P. 538. https://doi.org/10.3390/app11020538. EDN: BSGOVR.

iPolytech Journal

2025;29(1):33-50

8. Dutta N., Kaliannan P., Subramaniam U. Experimental analysis of PQ parameter estimation of VFD drives // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 937. Iss. 1. P. 012042. https://doi.org/ 10.1088/1757-899X/937/1/012042.

9. Jyothi R., Sumitgupta, Rao K.U., Jayapal R. IoT application for real-time condition monitoring of voltage source inverter driven induction motor // Innovative Data Communication Technologies and Application. 2021. Vol. 59. P. 97–105. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9651-3_8.

10. Ахмедов С.Б., Климов П.Л. Влияние распределенной генерации на базе возобновляемых источников энергии с использованием силовой электроники на резонанс на гармонических частотах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 1. С. 97–111. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-97-111. EDN: JZCIJV.

11. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Моделирование резонансных процессов на высших гармониках в тяговых сетях переменного тока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 3. С. 214–221. EDN: WMELHD.

12. Hu Haitao, Shao Yang, Tang Li, Ma Jin, He Zhengyou, Gao Shibin. Overview of harmonic and resonance in railway electrification systems // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54. Iss. 5. P. 5227–5245. https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2813967.

13. Анненков Е.О., Зубова Е.В., Селезнев А.С., Федосов Д.С. Оценка эффективности метода двух измерений при определении параметров схем замещения элементов электрической сети для высших гармонических составляющих токов и напряжений // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 401–414. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-401-414.

14. Silvério E.T., Macedo Junior J.R. Measuring and modeling the skin effect for harmonic power flow studies // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 23. P. 7913. https://doi.org/10.3390/en16237913.

15. Zhang Xiao-Ping, Yan Zuanhong. Energy quality: a definition // IEEE Open Access Journal of Power and Energy. 2020. Vol. 7. P. 430–440. https://doi.org/10.1109/OAJPE.2020.3029767.

16. Боровиков В.С., Волков М.В., Иванов В.В., Литвак В.В., Мельников В.А., Погонин А.И. [и др.]. Режимные свойства электрических сетей 110 кВ юга России в обеспечении эффективности транспорта электроэнергии: монография. Томск: STT, 2013. 268 с. EDN: TZMHRJ.

17. Боровиков В.С., Волков М.В., Иванов В.В., Литвак В.В., Мельников В.А., Погонин А.И., Харлов Н.Н. Опыт корпоративного обследования электрических сетей 110 кВ Сибири: монография. Томск: Томский политехнический университет, 2010. 227 с. EDN: QMLILB.

Харлов Н.Н. Резонансные режимы многопроводных линий электропередачи // Электричество. 2009. № 12.
 9–13.

19. Харлов Н.Н., Иванов В.В., Погонин А.В., Мельников В.А. Формирование уравнений установившихся несинусоидальных режимов электрических систем с учетом распределенности параметров ЛЭП // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 314. № 4. С. 56–59. EDN: KVYIBF.

20. Харлов Н.Н., Боровиков В.С., Литвак В.В., Погонин А.В., Мельников В.А. Энергетическое обследование несинусоидальных режимов многопроводных линий электропередачи // Электричество. 2011. № 12. С. 12–15.

21. Боровиков В.С., Харлов Н.Н., Акимжанов Т.Б. О необходимости включения добавочных потерь от высших гармоник тока в технологические потери при передаче электрической энергии // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 322. № 4. С. 91–93. EDN: QAREGB.

22. Akimzhanov T.B., Kharlov N.N., Borovikov V.S., Ushakov V.Y. Development of calculation methods for additional electrical power losses during transportation // The 9th International Forum on Strategic Technology (Cox's Bazar, 21–23 October 2014). Cox's Bazar: IEEE, 2014. P. 351–354. https://doi.org/10.1109/IFOST.2014.6991138. EDN: UFWCJV.

23. Payne A. Skin effect, proximity effect and the resistance of circular and rectangular conductors. 2021. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/351306996_SKIN_EFFECT_PROXIMITY_EFFECT_AND_THE_RESISTANCE_OF_CIRCULAR_AND_RECTANGULAR_CONDUCTORS (дата обращения: 25.09.2024).

24. Ramo S., Whinnery J.R., Van Duzer T. Fields and waves in communication electronics. 3rd ed. John Wiley & Sons, 1994. 858 p.

25. Ramo S., Whinnery J.R. Fields and waves in modern radio. 2nd ed. John Wiley & Sons, 1953. 576 p.

26. Monteiro J.H.A., Costa E.C.M., Pinto A.J.G., Kurokawa S., Gatous O.M.O., Pissolato J. Simplified skin-effect formulation for power transmission lines // IET Science, Measurement & Technology. 2014. Vol. 8. Iss. 2. P. 47–53. https://doi:10.1049/iet-smt.2013.0072.

27. Raven M.S. Skin effect in the time and frequency domain-comparison of power series and Bessel function solutions // Journal of Physics Communications. 2018. Vol. 2. No. 3. P. 035028. https://doi.org/10.1088/2399-6528/aab4a8.

28. Terman F.E. Radio engineer's handbook. Electrical and electronic engineering series. 1st ed. New York; London: McGraw-Hill Book Company, 1943. 1015 p.

29. Кафтанова Ю.В. Специальные функции математической физики. Харьков: Новое слово, 2009. 596 с.

30. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / пер. с фр.; под общей ред. К.С. Шифрина. М.: Наука, 1965. 780 с.

31. Kennelly A.E., Laws F.A., Pierce P.H. Experimental researches on skin effects in conductors // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1915. Vol. 34. Iss. 2. P. 1953–2021. https://doi.org/10.1109/ T-AIEE.1915.4765283. Belosvetov A.V., Manusov V.Z. Skin effect and active resistance of power transmission line wires

References

1. Levačić G., Župan A., Čurin M. An overview of harmonics in power transmission networks. In: First International Colloquium on Smart Grid Metrology. 2018. https://doi.org/10.23919/SMAGRIMET.2018.8369828.

2. Arrillaga J., Bradley D., Bodger P. Power system harmonics. (Russ. ed.: *Garmoniki v elektricheskih sistemah*. Moscow: Energoatomizdat; 1990, 320 p.)

3. Shandrygin D.A., Dovgun V.P., Egorov D.E., Manshin M.V. An analysis of resonant modes in electric power systems with a traction load. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(2):396-407. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-396-407. EDN: MPFYPK.

4. Bui Ngoc Hung, Kovernikova L.I. The applicability of active filters for reduction of voltage non-sinusoidality in the power supply system of a coal mine in Vietnam. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(2):318-332. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-318-332. EDN: KCTRQU.

5. Panteleev V.I., Kuzmin I.S., Zavalov A.A., Tikhonov A.V., Umetskaya E.V. Power quality in power supply systems of mining and processing enterprises in Russia. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3):356-368. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-356-368. EDN: SRSSJA.

6. Bebikhov Yu.V., Egorov A.N., Matul G.A., Semenov A.S., Kharitonov Ya.S. Search of ways to improve the efficiency of application of high-voltage frequency-regulated electric drive in conditions of mining production. *Natural and Technical Sciences*. 2018;8:228-234. (In Russ.).

7. Ashraf N., Abbas G., Abbassi R., Jerbi H. Power quality analysis of the output voltage of AC voltage and frequency controllers realized with various voltage control techniques. *Applied Sciences*. 2021;11(2):538. https://doi.org/10.3390/app11020538. EDN: BSGOVR.

8. Dutta N., Kaliannan P., Subramaniam U. Experimental analysis of PQ parameter estimation of VFD drives. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;937(1):012042. https://doi.org/10.1088/1757-899X/937/1/012042.

9. Jyothi R., Sumitgupta, Rao K.U., Jayapal R. IoT application for real-time condition monitoring of voltage source inverter driven induction motor. *Innovative Data Communication Technologies and Application*. 2021;59:97-105. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9651-3_8.

10. Akhmedov S.B., Klimov P.L. Effect of renewable energy-based distributed generation with power invertors on resonance at harmonic frequencies. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(1):97-111. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-97-111. EDN: JZCIJV.

11. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Modelling of highest harmonics resonant processes in alternating current traction nets. *Modern technologies. System analysis. Modeling.* 2016;3:214-221. (In Russ.). EDN: WMELHD.

12. Hu Haitao, Shao Yang, Tang Li, Ma Jin, He Zhengyou, Gao Shibin. Overview of harmonic and resonance in railway electrification systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018;54(5):5227-5245. https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2813967.

13. Annenkov E.O., Zubova E.V., Seleznev A.S., Fedosov D.S. Effectiveness of the method of two measurements in determining the parameters of equivalent circuits of electrical network elements for the highest harmonic components of currents and voltages. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):401-414. (In Russ.). https://doi.org/ 10.21285/1814-3520-2022-3-401-414.

14. Silvério E.T., Macedo Junior J.R. Measuring and modeling the skin effect for harmonic power flow studies. *Energies*. 2023;16(23):7913. https://doi.org/10.3390/en16237913.

15. Zhang Xiao-Ping, Yan Zuanhong. Energy quality: a definition. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*. 2020;7:430-440. https://doi.org/10.1109/OAJPE.2020.3029767.

16. Borovikov V.S., Volkov M.V., Litvak V.V., Kharlov N.N., Mel'nikov V.A., Pogonin A.I., et al. *Regime properties of electrical networks 110 kV in the south of Russia in ensuring efficient transport of electricity*. Tomsk: STT; 2013, 268 p. (In Russ.). EDN: TZMHRJ.

17. Borovikov V.S., Volkov M.V., Ivanov V.V., Litvak V.V., Mel'nikov V.A., Pogonin A.I., Kharlov N.N. *Experience of orporate surveying of 110 kV electrical networks in Siberia*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2010, 227 p. (In Russ.). EDN: QMLILB.

18. Kharlov N.N. Resonance modes of multi-wire power transmission lines. *Elektrichestvo*. 2009;12:9-13. (In Russ.). 19. Kharlov N.N., Ivanov V.V., Pogonin A.V., Melnikov V.A. Formation of equations of steady non-sinusoidal modes of electric systems subject to state of distribution of power line parameter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2009;314(4):56-59. (In Russ.). EDN: KVYIBF.

20. Kharlov N.N., Borovikov V.S., Litvak V.V., Pogonin A.V., Mel'nikov V.A. Energy survey of non-sinusoidal modes of multi-wire power transmission lines. *Elektrichestvo*. 2011;12:12-15. (In Russ.).

21. Borovikov V.S., Kharlov N.N., Akimzhanov T.B. On the need to include additional losses from higher current harmonics in process losses during electric power transmission. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013;322(4):91-93. (In Russ.). EDN: QAREGB.

22. Akimzhanov T.B., Kharlov N.N., Borovikov V.S., Ushakov V.Y. Development of calculation methods for additional electrical power losses during transportation. In: *The 9th International Forum on Strategic Technology*. 21–23 October 2014, Cox's Bazar. Cox's Bazar: IEEE; 2014, p. 351-354. (In Russ.). https://doi.org/10.1109/IFOST.2014.6991138. EDN: UFWCJV.

Polytech Journal

2025:29(1):33-50

ISSN 2782-6341 (online)

23. Payne A. Skin effect, proximity effect and the resistance of circular and rectangular conductors. 2021. Available from: https://www.researchgate.net/publication/351306996_SKIN_EFFECT_PROXIMITY_EFFECT_AND_THE_RET SISTANCE_OF_CIRCULAR_AND_RECTANGULAR_CONDUCTORS [Accessed 25th September 2024].

24. Ramo S., Whinnery J.R., Van Duzer T. Fields and waves in communication electronics. John Wiley & Sons; 1994, 858 p.

25. Ramo S., Whinnery J.R. *Fields and waves in modern radio.* 2nd ed. John Wiley & Sons; 1953, 576 p. 26. Monteiro J.H.A., Costa E.C.M., Pinto A.J.G., Kurokawa S., Gatous O.M.O., Pissolato J. Simplified skin-effect formulation for power transmission lines. *IET Science, Measurement & Technology.* 2014;8(2):47-53. https://doi: 10.1049/iet-smt.2013.0072.

27. Raven M.S. Skin effect in the time and frequency domain-comparison of power series and Bessel function solutions. *Journal of Physics Communications*. 2018;2(3):035028. https://doi.org/10.1088/2399-6528/aab4a8. 28. Terman F.E. *Radio engineer's handbook. Electrical and electronic engineering series*. New York; London: McGraw-Hill Book Company; 1943, 1015 p.

29. Kaftanova Yu.V. Special functions of mathematical physics. Har'kov: Novoe slovo; 2009, 596 p. (In Russ.). 30. Angot A. Complements de mathematiques. A lusage des ingenieurs de lelekerotechnique et des telecommunications. Paris, 1957. (Russ. ed.: *Matematika dlya elektro- i radioinzhenerov*. Moscow: Nauka; 1965, 780 p.) 31. Kennelly A.E., Laws F.A., Pierce P.H. Experimental researches on skin effects in conductors. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. 1915;34(2):1953-2021. https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1915.4765283.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Белосветов Антон Витальевич,

аспирант,

Сибирский государственный университет водного транспорта,

630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, Россия belosvetov-anton@mail.ru

Манусов Вадим Зиновьевич,

д.т.н., профессор, профессор Физико-математической школы, Югорский государственный университет, 628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16, Россия Manusov36@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.12.2024 г.; одобрена после рецензирования 20.01.2025 г.; принята к публикации 30.01.2025 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton V. Belosvetov,

Postgraduate Student, Siberian State University of Water Transport, 33, Shchetinkina str., Novosibirsk 630099, Russia ⊠ belosvetov-anton@mail.ru

Vadim Z. Manusov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Physics and Mathematics School, Yugra State University, 16, Chekhova str., Khanty-Mansiysk 628011, Russia Manusov36@mail.ru

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 18.12.2024; approved after reviewing 20.01.2025; accepted for publication 30.01.2025.

Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. 51-65 2025;29(1):51-65

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья УДК 621.316.11 EDN: JMKLAJ DOI: 10.21285/1814-3520-2025-1-51-65

Контроль температуры токопроводящей жилы защищённых проводов воздушных линий по значениям температуры на поверхности изоляции

С.С. Гиршин¹[∞], В.Н. Горюнов², Е.В. Петрова³, В.А. Криволапов⁴, В.А. Деев⁵, К.С. Щербаков⁶, М.Ю. Николаев⁷

¹⁻⁷Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Резюме. Целью исследований является разработка и численная проверка методики определения температуры жилы изолированного провода на основе измерений электрического тока и температуры поверхности изоляции при использовании технологии Smart Grid. В исследованиях использовалась математическая модель теплового режима провода в форме алгебраического уравнения четвертой степени, для решения которого был применен метод Феррари. Моделирование температурных полей, необходимое для получения результатов сравнения, производилось методом конечных элементов COMSOL Multiphysics. Идентификация температуры жилы с учетом погрешностей измерения осуществлялась на основе метода наименьших квадратов совместно с методом золотого сечения. На основе метода конечных элементов изучено распределение температуры в сечении защищенного провода СИП-З, а также на поверхности его изоляции. В результате моделирования получены зависимости изменения максимальной и минимальной температуры поверхности изоляции провода в зависимости от скорости ветра при предельно допустимой температуре жилы. Показано, что разность максимальной и минимальной температуры поверхности может достигать примерно 25°С при скорости ветра 3-4 м/с. По результатам исследований получена функция, минимизация которой позволяет найти температуру токопроводящей жилы защищенного провода по значениям температуры на поверхности изоляции. Сравнительный анализ разработанного метода определения температуры жилы и метода конечных элементов дает погрешность расчетов в 0,44°С при условии точного задания значения электрического тока. Результаты исследования указывают на необходимость учета неравномерности распределения температуры на поверхности изоляции защищенных проводников при мониторинге линий электропередачи. Разработанная методика расчета температуры жилы по измерительным данным дает высокую точность при любой практически возможной неравномерности температуры поверхности, если погрешность измерения тока не превышает 5%.

Ключевые слова: уравнение теплового баланса, пропускная способность, защищенный провод, воздушная линия, метод конечных элементов, температура жилы

Для цитирования: Гиршин С.С., Горюнов В.Н., Петрова Е.В., Криволапов В.А., Деев В.А., Щербаков К.С., Николаев М.Ю. Контроль температуры токопроводящей жилы защищённых проводов воздушных линий по значениям температуры на поверхности изоляции // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 1. С. 51–65. https://doi.org/ 10.21285/1814-3520-2025-1-51-65. EDN: JMKLAJ.

POWER ENGINEERING

Original article

Temperature control of aerial current-carrying conductors by insulation surface temperature

Stanislav S. Girshin^{1⊠}, Vladimir N. Goryunov², Elena V. Petrova³, Vladislav A. Krivolapov⁴, Vladislav A. Deev⁵, Kirill S. Shcherbakov⁶, Mikhail Yu. Nikolayev⁷

¹⁻⁷Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Abstract. This study aims to develop and carry out numerical analysis of a methodology for determining the temperature of conductors of insulated wires, which implies measuring electric current and insulation surface temperature as well as using Smart Grid technology. We used a mathematical model of thermal conditions for conductors in the form of an algebraic fourth-degree equation and the Ferrari method to solve this equation. Simulation

© Гиршин С.С., Горюнов В.Н., Петрова Е.В., Криволапов В.А., Деев В.А., Щербаков К.С. [и др.]., 2025

https://ipolytech.elpub.ru -



ISSN 2782-6341 (online)

2025;29(1):51-65

of temperature fields providing comparison results was carried out using the finite element method in the COMSOL Multiphysics. The temperature of conductors was measured taking into account measurement errors and using the least squares method together with the golden-section search. The finite element method made it possible to study temperature distribution in the section of SIP-3 shielded wire as well as in its insulation surface. The dependencies of changes in the maximum and minimal temperatures of the wire insulation surface were obtained as a result of simulation; these dependencies were influenced by wind speed changes at the maximum permissible temperature of conductors. The difference between the maximum and minimum surface temperatures was shown to reach approximately 25° C at wind speeds of 3-4 m/s. Our study resulted in function, the minimization of which makes it possible to find the temperature of current-carrying conductors of shielded wires by values of the insulation surface temperature of conductors and the finite element method provided the calculation error of 0.44° C given accurate settings of electric current value. The study results substantiate the need to take into account the nonuniformity in temperature distribution on the insulation surface of shielded conductors when monitoring power lines. The developed methodology for calculating the temperature distribution on the insulation surface of shielded conductors when monitoring power lines. The developed methodology for calculating the temperature of conductors by measurement data provides high accuracy at almost any nonuniformity in the surface temperature provided that the current measurement error equals 5% or less.

Keywords: heat balance equation, transmission capacity, protected wire, overhead line, finite element method, core temperature

For citation: Girshin S.S., Goryunov V.N., Petrova E.V., Krivolapov V.A., Deev V.A., Shcherbakov K.S., Nikolayev M.Yu. Temperature control of aerial current-carrying conductors by insulation surface temperature. *iPolytech Journal*. 2025;29(1):51-65. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-51-65. EDN: JMKLAJ.

введение

В условиях стремительного роста электрических нагрузок^{7,8} для более точной оценки пропускной способности линий в настоящее время активно внедряются методы оценки динамической пропускной способности [1–5], так как классические решения имеют высокие финансовые и временные затраты [6–8]. Данные методы требуют наличия достаточных вычислительных мощностей, однако позволяют использовать для оценки режимов линии весь массив метеорологических данных: температуру окружающей среды, скорость ветра, интенсивность солнечного излучения и атмосферное давление [9].

Для непосредственного контроля режима линии необходимо знать фактическое значение температуры жилы [10]. Для воздушных линий с традиционными неизолированными сталеалюминевыми проводами определение температуры жилы достаточно просто выполнить тепловизионным методом [11] или на основе специальных математических моделей [12, 13]. Для защищенных проводов определение температуры жилы возможно с помощью математической модели [14] через температуру на поверхности изоляции, предполагая, что эта температура во всех точках на поверхности изоляции одинакова. Однако для проводов, обладающих слоем изоляции, теплопроводность которого на три порядка меньше теплопроводности алюминия [15], любая неравномерность по условию теплоотдачи приводит к неоднородности температуры на его поверхности [16]. В данном случае тепловизионный метод даст значительную неопределенность в определении температуры поверхности проводника, а равнозначно и в определении температуры жилы.

Известно, что интенсивность конвекции на поверхности тела возрастает с увеличением скорости обтекания его жидкостью или газом [17]. Обтекание проводов ветром практически во всех случаях находится за пределами режимов ламинарного течения, что приводит к сложной картине распределения скоростей в окрестностях провода. На поверхности провода возникают области срыва потока и значительных завихрений, что является первопричиной неравномерности в режимах конвективной теплоотдачи и температуры по поверхности провода.

Целью данного исследования является изучение влияние распределения температуры на поверхности изоляции защищенных проводов на температуру токопроводящей жилы.

⁷Energy Outlook 2024 // British Petroleum. Режим доступа: https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=ee43ab35ac17-4862-97a2-bd67c5d981c3 (дата обращения: 26.09.2024).

⁸World Energy Investment 2024 // International Energy Agency [Электронный pecypc]. URL: https://www. connaissancedesenergies.org/sites/connaissancedesenergies.org/files/pdf-actualites/WorldEnergyInvestment2024.pdf (дата обращения: 26.09.2024).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Установим функциональную связь между силой тока *I* и абсолютной температурой поверхности провода. Уравнение теплового баланса [14]:

$$\frac{\Delta P_0 \left[1 + \alpha_0 \theta_{\text{snew}}\right]}{1 - \alpha_0 \Delta P_0 S_{us}} = d_{np} \left[\pi \alpha_{\text{sbin}} \left(T_{\text{snew}} - T_{\text{okp}} \right) + \pi \varepsilon_n C_0 \left(T_{\text{snew}}^4 - T_{\text{okp}}^4 \right) - A_s q_{\text{conn}} \right], \tag{1}$$

где $\Delta P_0 = I^2 R_0$ – потери активной мощности на единицу длины, вычисленные при сопротивлении, приведенном к 0°С, Вт/м; $\theta_{{}_{BHeW}} = T_{{}_{BHeW}} - 273,15$ – температура поверхности провода, °С; d_{np} – диаметр провода, м; S_{u_3} – тепловое сопротивление изоляции на единицу длины провода, м: K/BT; $\alpha_{{}_{BbH}}$ – коэффициент теплоотдачи вынужденной конвекцией, Вт/(м²·K); ε_n – коэффициент черноты поверхности провода для инфракрасного излучения; $C_0 = 5,67\cdot10^{-8}$ – постоянная излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·K⁴); $T_{{}_{BHeW}}$ и T_{okp} – абсолютные температуры поверхности провода и окружающей среды, К; A_s – поглощательная способность поверхности провода, К; σ_0 – температурный коэффициент электрического сопротивления при 0°С, °С⁻¹.

Согласно уравнению (1):

$$\frac{\Delta P_0}{1 - \alpha_0 \Delta P_0 S_{us}} = d_{np} \frac{\pi \alpha_{\text{\tiny obsile}} \left(T_{\text{\tiny olecus}} - T_{\text{\tiny okp}} \right) + \pi \varepsilon_n C_0 \left(T_{\text{\tiny olecus}}^4 - T_{\text{\tiny okp}}^4 \right) - A_s q_{\text{\tiny cont}}}{1\alpha + _0 \left(T_{\text{\tiny olecus}} - 273, 15 \right)}.$$
(2)

Полученное уравнение приведем к следующему виду:

$$\Delta P_0 \left[1 + \alpha_0 (T_{\text{\tiny GHeuu}} - 273, 15) \right] = d_{np} \left(1 - \alpha_0 \Delta P_0 S_{u_3} \right) \left[\pi \alpha_{\text{\tiny GHeuu}} - T_{o_{KP}} \right) + \pi \varepsilon_n C_0 \left(T_{\text{\tiny GHeuu}}^4 - T_{o_{KP}}^4 \right) - A_s q_{cont} \right]. \tag{3}$$

Окончательно получим

$$\Delta P_{0} = \frac{d_{np} \left[\pi \alpha_{\text{вын}} \left(T_{\text{енеш}} - T_{\text{окр}} \right) + \pi \varepsilon_{n} C_{0} \left(T_{\text{енеш}}^{4} - T_{\text{окp}}^{4} \right) - A_{s} q_{\text{солн}} \right]}{1 + \alpha_{0} \left(T_{\text{енеш}} - 273, 15 \right) + d_{np} \alpha_{0} S_{us} \left[\pi \alpha_{\text{еьм}} \left(T_{\text{енеш}} - T_{\text{окp}} \right) + \pi \varepsilon_{n} C_{0} \left(T_{\text{енеш}}^{4} - T_{\text{окp}}^{4} \right) - A_{s} q_{\text{солн}} \right]};$$

$$\tag{4}$$

$$I^{2} = \frac{T_{aneuu}^{4} + A_{11}T_{aneuu} - A_{01}}{A_{22}T_{aneuu}^{4} + A_{12}T_{aneuu} - A_{02}},$$
(5)

где A₁₁, A₀₁, A₂₂, A₁₂, A₀₂ – вспомогательные коэффициенты:

$$A_{11} = \frac{\alpha_{\text{sourr}}}{\varepsilon_n C_0}; \tag{6}$$

$$A_{01} = T_{o_{KP}}^4 + \frac{\alpha_{BHH} T_{o_{KP}}}{\varepsilon_n C_0} + \frac{A_s q_{conH}}{\pi \varepsilon_n C_0};$$
⁽⁷⁾

$$A_{22} = \alpha_0 S_{us} R_0;$$
 (8)

$$A_{12} = \frac{R_0 \alpha}{\pi d_{np} \varepsilon_n C_0} + \frac{\alpha_0 S_{u3} \alpha_{sbin} R_0}{\varepsilon_n C_0} = \frac{\alpha_0 R_0}{\varepsilon_n C_0} \left(\frac{1}{\pi d_{np}} + \alpha_{sbin} S_{u3} \right);$$
(9)

$$A_{02} = \left(\alpha_0 S_{u_3} A_{01} + \frac{273,15\alpha_0 - 1}{\pi d_{np} \varepsilon_n C_0}\right) R_0.$$
(10)

Температуры в разных точках поверхности провода, в частности на подветренной и наветренной сторонах, неодинаковы. Поэтому измерения температуры $\theta_{\text{внеш}}$ целесообразно производить в нескольких точках. Точки выбираются так, чтобы значения температуры поверхности отличались друг от друга как можно больше (минимальное количество точек измерений – 2). В результате фиксируется минимальное и максимальное значения θ_{min} , θ_{max} . За окончательный результат измерения примем $\theta_{\text{изм}} = 0.5(\theta_{min} + \theta_{max})$.

iPolytech Journal 2025. T. 29. № 1. C. 51-65 ISSN 2782-4004 (print) 2025;29(1):51-65 ISSN 2782-6341 (online)

Из-за погрешностей измерения, а также погрешностей, связанных с отклонением теплового режима от стационарности, измеренному току *I*_{изм} и температуре *θ*_{изм} могут соответствовать несколько разные значения температуры жилы *θ*. Требуется согласовывать (скорректировать) измеренные значения тока *I*_{изм} и температуры *θ*_{изм} так, чтобы им соответствовала одна и та же температура жилы *θ*. Эта температура и будет окончательным результатом расчета.

Обозначим согласованные значения тока и температуры поверхности изоляции как *I*_{согл}, *θ*_{согл}. Критерием согласования будет минимум суммы квадратов отклонений измеренных значений от согласованных, переведенных в безразмерную сопоставимую форму.

Для отклонения температуры используем оценку вида:

$$\Delta \theta = \frac{\theta_{u_{3M}} - \theta_{cocn}}{\theta_{u_{3M}} - \theta_{okp}}.$$
(11)

По смыслу это относительная разность превышений температуры поверхности провода над температурой окружающей среды. Если знаменатель формулы (11) равен нулю, то провод малозагружен либо совершенно не загружен по току. Тогда коррекция не имеет смысла, и следует принимать $\theta = \theta_{okp}$.

Поскольку превышение температуры определяется квадратом тока, то вместо отклонений токов будет отклонение их квадратов:

$$\Delta I = \frac{I_{u_{3M}}^2 - I_{coll}^2}{I_{u_{3M}}^2}.$$
 (12)

Таким образом, значение $\theta_{\text{согл}}$ находится путем минимизации функции:

$$F(\theta_{co2n}) = \Delta\theta^{2} + \Delta I^{2} = \left(\frac{\theta_{u3M} - \theta_{co2n}}{\theta_{u3M} - \theta_{oKP}}\right)^{2} + \left(1 - \frac{\left[\theta_{u3M} + 273.15\right]^{4} + A_{11}\left[\theta_{u3M} + 273.15\right] - A_{01}}{A_{22}\left[\theta_{u3M} + 273.15\right]^{4} + A_{12}\left[\theta_{u3M} + 273.15\right] - A_{02}} \cdot \frac{1}{I_{u3M}^{2}}\right)^{2} \rightarrow \text{min.}$$
(13)

Решение можно найти методом золотого сечения. Интервал, на котором осуществляется поиск, следует ограничить значениями $\theta_{_{ИЗM}}$ и $\theta_{_{BHeш}}(I_{_{ИЗM}})$. Последнее определяется путем решения уравнения теплового баланса методом Феррари при токе $I_{_{ИЗM}}$. Если $\theta_{_{BHeш}}(I_{_{ИЗM}}) > \theta_{_{ИЗM}}$, то интервал будет $\theta_{_{ИЗM}} \leq \theta_{_{СОГЛ}} \leq \theta_{_{BHeш}}(I_{_{ИЗM}})$. В противном случае $\theta_{_{BHeш}}(I_{_{ИЗM}}) \leq \theta_{_{СОГЛ}} \leq \theta_{_{ИЗM}}$.

Окончательное значение температуры жилы:

$$\theta = \frac{\theta_{co27} + P_0 S_{u_3}}{1 - \alpha_0 \Delta P_0 S_{u_3}} = \frac{\theta_{co27} + I_{co27}^2 R_0 S_{u_3}}{1 - \alpha_0 I_{co27}^2 R_0 S_{u_3}}.$$
(14)

Формулу (14) можно использовать в том случае, если температура на поверхности изоляции проводника в различных точках по окружности из-за солнечного излучения или ветра имеет отличающиеся значения. Этот случай соответствует важному на практике варианту эксплуатации воздушных линий электропередачи с новыми защищенными изоляцией проводами СИП (самонесущий изолированный провод).

Рассматриваемая методика, строго говоря, справедлива только для установившегося теплового режима провода, когда ток и температура жилы не зависят от времени. Однако, поскольку методика предполагает наличие погрешностей измерения, то она будет допускать и определенные отклонения от стационарности. Анализ вариаций параметров во времени, при которых методика дает допустимую точность восстановления температуры жилы, выходит за рамки данной статьи.

Значение температуры защищенного провода можно определить с помощью непосредственного измерения температуры на поверхности провода специальными датчиками с последующим вычислением. Конструкция датчика, который может быть рекомендован для одновременного измерения температуры в различных точках с разной температурой на поверхности изоляции, представлена в [18].

Датчик включает в себя трансформатор тока (TT) для генерации энергии, блок питания, TT для датчика тока, блок датчика температуры и блок управления/беспроводной связи. Трансформатор тока для выработки электроэнергии генерирует индукционный ток на основе магнитного поля, создаваемого током линии электропередачи. Блок питания преобразует переменный ток, вырабатываемый ТТ, в постоянный ток. Блок датчиков температуры осуществляет измерение температуры линии электропередачи. Блок управления/беспроводной связи обрабатывает полученные данные о температуре и значении тока, после чего передает их на концентратор посредством многоканальной связи.

Монтаж датчика включает в себя фиксацию его проводниковой части на линии электропередачи с последующим затягиванием винтов по бокам цилиндрического корпуса. Система не требует наличия аккумулятора, поскольку обладает способностью к самозарядке. Датчик температуры спроектирован таким образом, чтобы его можно было установить непосредственно на проводник для повышения точности измерений. Расстояние между основным блоком и датчиком, а также положение самого датчика можно регулировать, что обеспечивает возможность установки в различных конфигурациях. Терминал разработан для обеспечения функционирования в условиях повышенных температур, достигающих 90°С. Данные должны передаваться на сервер с минимально возможным интервалом времени.

МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В качестве метода исследования распределения температуры в защищенном проводе выбран один из наиболее эффективных методов – метод конечных элементов [19].

Метод конечных элементов подразумевает разделение сложной математической модели на множество небольших неперекрывающихся компонентов с простой геометрией, известных как конечные элементы. Эти элементы могут принимать различные формы, такие как треугольники, четырехугольники или тетраэдры, в зависимости от конкретной задачи. Элементы соединяются между собой в общих узловых точках. Для каждого элемента используется приближенная функция для представления поведения физических величин внутри него (таких как напряжение или температура). Уравнения, описывающие поведение каждого элемента и исходные данные, интегрируются в единую систему уравнений, которая представляет всю изучаемую область. Результирующая система обычно представляет собой большой набор линейных или нелинейных уравнений, который решается с помощью численных методов, таких как итерационный метод. Метод конечных элементов позволяет гибко учитывать или игнорировать различные физические эффекты и применяется для анализа сложных объектов и явлений в инженерии, физике и науке.

Основные этапы моделирования включают:

- 1) создание геометрии объекта или области;
- 2) разбиение на конечные элементы;
- 3) указание физических свойств материалов и граничных условий;
- 4) выполнение расчетов;
- 5) анализ результатов.

Известно, что линейное выделение тепла в проводе описывается выражением:

$$\Delta P(\theta) = I^2 R_0 \left(1 + \alpha_0 \theta \right), \tag{15}$$

где *I* – сила ток в проводнике, А; R_0 – погонное сопротивление проводника при 0°С, Ом/м; θ – фактическая температура жилы, °С; $\Delta P(\theta)$ – нагрузочные потери мощности на единицу длины, Вт/м.

Таким образом, при нахождении предельного термического режима параметр *I*²*R*₀ можно считать постоянной величиной, а моделирование производить, только решая уравнения Фурье и Навье-Стокса, что значительно облегчает модель. При этом объемное тепловыделение возможно задать следующим линейным законом:

$$q(\theta) = q_0 (1 + \alpha_0 \theta), \tag{16}$$

где $q(\theta)$ – объемное тепловыделение при любой другой температуре, Вт/м³; $q_0 = j^2 \rho_0 = (I/S)^2 \rho_0 -$ объемное тепловыделение при 0°С, Вт/м³; *j* – плотность тока, А/м²; S – сечение проводника, м².

Polytech Journal 2025;29(1):51-65

2025. T. 29. № 1. C. 51-65

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Указанным методом проведем изучение проводника марки СИП-3 сечением 35 мм². Для упрощения тепловой модели из расчета исключается многопроволочный характер жилы, а потому все сечения проводника предполагаются сплошными. Геометрия СИП-З приведена на рис. 1.



Рис. 1. Геометрия исследуемого проводника Fig. 1. Geometry of the conductor under study

Расчет теплового состояния провода производился в программной системе анализа методом конечных элементов COMSOL Multiphysics. Исходные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные Table 1. Input data

Теплопроводность алюминия ⁹ λ _{ал} , Вт/м-К	237
Теплопроводность сшитого полиэтилена λ _{сп} , Вт/м·К [15]	0,28
Температура окружающей среды θ _{окр} , °C	0
Удельное сопротивление алюминия ¹⁰ при 20°С <i>р</i> ₂₀, Ом·м,	2,83×10 ⁻⁸
Температурный коэффициент сопротивления ¹¹ при 20°С а20, °С ⁻¹	0,004
Коэффициент излучения поверхности провода ε [20]	0,8
Интенсивность солнечного излучения <i>q</i> _{солн} , Вт/м ²	0
Атмосферное давление р, Па	101325
Сечение проводника S, мм ²	35

Для расчета использовались следующие интерфейсы:

- Heat Transfer [ht] (теплопередача в твердых телах);
- Turbulent Flow [spf] (турбулентное течение);
- Nonisothermal Flow [nitf] (неизотермическое течение).

В качестве основной модели турбулентности выбрана Shear Stress Transport, так как на сегодняшний день она является мировым стандартом в анализе течения жидкости или газа как для научных целей, так и для целей проектирования. Разбиение окрестностей исследуемого проводника показано на рис. 2. Модель состоит из более чем 45 тыс. элементов ячеек сетки. Среднее время расчета модели составляет менее 4 мин (процессор: AMD Ryzen 5 2600; оперативная память: DDR4 16 Gb 3200 MHz).

⁹Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник. М: Металлургия, 1989. 384 с.

¹⁰Герасимов В.Г. Электротехнический справочник. В 4 т; т. 2. Электротехнические изделия и устройства. М.: МЭИ, 2003. 519 с. ¹¹Герасимов В.Г. Электротехнический справочник. В 4 т; т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы. М.: МЭИ, 2003. 440 c.

Гиршин С.С., Горюнов В.Н., Петрова Е.В. и др. Контроль температуры токопроводящей жилы защищённых проводов... Girshin S.S., Goryunov V.N., Petrova E.V., et al. Temperature control of aerial current-carrying conductors by insulation surface...



Рис. 2. Деления окрестностей исследуемого проводника на конечные элементы **Fig. 2.** Finite element mesh of the studied conductor vicinity

Сама область моделирования представляет собой квадрат со сторонами 400 на 400 мм, в центре которого расположен СИП-З 1×35 (рис. 3).



Fig. 3. Boundary conditions of the modeling domain

Согласно климатическим справочникам, среднегодовая скорость ветра в Омской области составляет 2,6 м/с с зафиксированным максимумом в 24,8 м/с. Для анализа было решено ограничиться значением скорости ветра в 20 м/с.



2025. T. 29. № 1. C. 51-65 2025:29(1):51-65

ISSN 2782-6341 (online)

Результаты моделирования при скорости 20 м/с показаны на рис. 4 и 5.



Рис. 4. Изоконтуры скорости ветра в окрестностях исследуемого проводника, м/с **Fig. 4.** Wind speed isocontours in the studied conductor vicinity, m/s



Рис. 5. Поле температуры в окрестности исследуемого проводника **Fig. 5.** Temperature field in the studied conductor vicinity

Поскольку решение методом конечных элементов дает картину полей, возможно получить подробную картину распределения температуры как в любом сечении, так и на поверхности проводника, что показано на рис. 6 и 7.

Гиршин С.С., Горюнов В.Н., Петрова Е.В. и др. Контроль температуры токопроводящей жилы защищённых проводов... Girshin S.S., Goryunov V.N., Petrova E.V., et al. Temperature control of aerial current-carrying conductors by insulation surface...



Рис. 6. Распределение температуры по горизонтальному сечению **Fig. 6.** Temperature distribution over the horizontal section



Рис. 7. График распределения температуры по поверхности проводника в предельном термическом режиме **Fig. 7.** Diagram of temperature distribution over conductor surface in the limiting thermal mode

Представленная на рис. 7 зависимость температуры поверхности провода от угловой координаты показывает значительную разницу в температурах, составляющую 18,5°С. По-грешность определения температуры жилы для этого случая составляет 20,5%.

Для оценки разницы температур в широком диапазоне скоростей ветра была проведена серия моделирования с шагом в 2,5 м/с. Результаты моделирования приведены в табл. 2. Polytech Journal

2025;29(1):51-65

ISSN 2782-6341 (online)

Таблица 2. Массив полученных данных Table 2. Array of received data

Скорость ветра, м/с	Сила тока при моделировании методом конечных элементов I _{МКЭ} , А	а тока при елировании Средняя Максимальная методом температура температура онечных поверхно- лементов сти, °С °С I _{MKЭ} , A		Минималь- ная температура поверхности $ heta_{max},\ ^{\circ}C$	Погонные потери в провод- нике, Вт/м	Темпера тура жилы Ө _{мкэ} , °С
1,0	281,91	64,554	74,455	52,995	82,260	90,003
2,5	325,56	56,046	68,429	43,169	109,73	89,994
5,0	362,43	47,960	61,167	35,454	136,04	89,989
7,5	384,82	42,664	55,582	31,022	153,35	90,017
10,0	400,36	38,732	51,079	27,956	165,95	89,983
12,5	411,95	35,659	47,324	25,639	175,71	89,987
15,0	421,24	33,212	44,321	23,830	183,69	90,011
17,5	428,74	31,174	41,728	22,329	190,34	89,997
20,0	434,99	29,445	39,532	21,054	195,94	90,000

Исходя из полученных данных, пик разности температур наблюдается при скорости 2,5– 5 м/с, что соответствует наиболее вероятной скорости ветра. Графически эта зависимость приведена на рис. 8. При низких скоростях ветра условия охлаждения на подветренной и наветренной сторонах примерно эквивалентны, что приводит к небольшой разнице температур на поверхности изоляции. По мере увеличения скорости ветра эта разница становится больше из-за увеличивающегося различия в условиях охлаждения между подветренной и наветренной сторонами. Одновременно с этим разность между температурой поверхности изоляции и окружающей среды уменьшается. Данная тенденция в конечном итоге приводит к сближению максимальной и минимальной температуры поверхности изоляции.



Рис. 8. Зависимость разницы между максимумом и минимумом температур на поверхности провода от скорости ветра **Fig. 8.** Difference between maximum and minimum temperatures on wire surface vs wind speed

Результаты сравнения математической модели с результатами метода конечных элементов при скорости ветра 5 м/с отображены в табл. З. Для большего анализа введена искусственная погрешность измеренного тока $\Delta I_{\mu_{MM}}$ в диапазоне от -25 до +25% с шагом 5%.

ΔI _{изм} , %	$\Delta I_{u_{3M}} = I_{MK\Im} \times \left[1 + \frac{\Delta I_{u_{3M}}}{100}\right],$ A	θ _{согл} , °С	I _{corn} , A	θ, °C	$\begin{array}{l} \Delta \theta_{\mathrm{sc}} = \\ = \theta - \theta_{\mathrm{MKO}}, \\ ^{\circ}\mathrm{C} \end{array}$	$\Delta \theta_{co27} = \\ = \theta_{co27} - \theta_{u3M}, \\ ^{\circ}C$	$\Delta I_{co27} = \frac{\Delta I_{co27} - I_{u3M}}{I_{co27}} \times \frac{I_{co27}}{100\%}$
-25	271,820	29,939	302,071	56,040	-33,949	-18,372	11,128
-20	289,940	34,413	319,411	64,456	-25,533	-13,897	10,163
-15	308,070	38,630	334,158	72,398	-17,591	-9,681	8,470
-10	326,190	42,386	346,204	79,482	-10,507	-5,924	6,137
-5	344,310	45,576	355,731	85,503	-4,486	-2,735	3,318
0	362,430	48,181	363,089	90,426	0,437	-0,129	0,182
5	380,552	50,248	368,677	94,334	4,345	1,937	-3,120
10	398,673	51,849	372,865	97,364	7,375	3,538	-6,473
15	416,794	53,063	375,964	99,663	9,674	4,752	-9,796
20	434,916	53,965	378,225	101,372	11,383	5,655	-13,035
25	453,038	54,619	379,841	102,610	12,621	6,308	-16,157

Таблица 3. Сравнительный анализ Table 3. Comparative analysis

Для большего анализа введена искусственная погрешность измеренного тока $\Delta I_{_{M3M}}$ в диапазоне от -25 до +25% с шагом 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Различные сценарии развития энергетики Net Zero, Accelerated, New Momentum-прогнозируют ежегодное увеличение производства электрической энергии. В этих условиях возникает потребность повышения пропускной способности линий электропередачи. Реальной альтернативой традиционным путям решения проблемы (строительство новых линий, повышение напряжения и т. д.) является использование данных о погодных условиях и применение новых типов проводов с защитным слоем изоляции.

Указанная альтернатива требует изучения особенностей применения защищенных проводов и разработки соответствующего математического обеспечения. Пропускная способность линий электропередачи зависит от значения температуры токопроводящей жилы. Эту температуру для защищенных проводов можно найти через температуру на поверхности изоляции по формулам, ранее полученным авторами статьи. Однако эти формулы получены при предположении, что температура на поверхности изоляции во всех точках одинакова.

Результаты моделирования методом конечных элементов при наличии ветра показали, что температура на поверхности изоляции различна. Отмечаются практически неизменные значения температуры в пределах жилы и значительные изменения в области изоляции. Детальное изучение распределения температуры поверхности защищенного провода СИП-3 и использование уравнения теплового баланса позволили получить соотношения, связывающие максимальные и минимальные значения температуры, которые наблюдаются на поверхности изоляции, с температурой токопроводящей жилы. Допущением при моделировании является сплошной характер материала жилы, в отличие от многопроволочной реальной конструкции с воздушными промежутками.

Установлено, что при скорости 20 м/с максимальная разница в температурах составляет 18,5°С. Выполнена оценка влияния величины скорости ветра на разницу между максимальным и минимальным значениями температуры на поверхности изоляции. Диапазон скоростей в эксперименте (1–20 м/с) с интервалом 2,5 м/с соответствует статистике ветров в Омской области. Величина тока в токопроводящей жиле задавалась исходя из предельной температуры жилы 90°С. На основе численного эксперимента выявлен максимум разности температур в 26°С при скорости ветра в диапазоне от 3 до 4 м/с.

Сравнительный анализ математической модели с методом конечных элементов при точном измерении силы тока дает погрешности расчета температуры жилы в 0,44°С. При ошибке измерения силы тока в ±5% погрешность температуры жилы возрастает приблизительно до ±4,5°С. Метод конечных элементов принят при сравнении в качестве эталона. Сравнение проводилось при скорости ветра 5 м/с, которая несколько превышает значение, соответствующее максимуму разности температур в разных точках поверхности провода. Близость к максимуму разности температур поверхности позволяет в достаточной степени учесть погрешности измерения температуры поверхности, а некоторое повышение скорости ветра дает возможность повысить ток при допустимой температуре, что усиливает влияние погрешности тока.

Проведенные исследования представляются полезными в задачах увеличения пропускной способности линий электропередачи с защищенными изоляцией проводами.

Список источников

1. Hasan M.K., Ahmed M.M., Musa S.S., Islam S., Abdullah S.N.H.S., Hossain E. An improved dynamic thermal current rating model for PMU-based wide area measurement framework for reliability analysis utilizing sensor cloud system // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 14446–14458. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3052368.

2. Lai Ching-Ming, Teh Jiashen. Comprehensive review of the dynamic thermal rating system for sustainable electrical power systems // Energy Reports. 2022. Vol. 8. P. 3263–3288. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.085.

3. El-Azab M., Omran W.A., Mekhamer S.F., Talaat H.E.A. Congestion management of power systems by optimizing grid topology and using dynamic thermal rating // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 199. P. 107433. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107433.

 Dawson L., Knight A.M. Investigating the impact of a dynamic thermal rating on wind farm integration // IET Generation, Transmission & Distribution. 2023. Vol. 17. Iss. 4. P. 2449–2457. https://doi.org/10.1049/gtd2.12821.
 Lai Ching-Ming, Teh Jiashen, Alharbi B., AlKassem A., Aljabr A., Alshammari N. Optimisation of generation unit commitment and network topology with the dynamic thermal rating system considering N-1 reliability // Electric Power Systems Research. 2023. Vol. 221. P. 109444. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109444.

6. Zainuddin N.M., Rahman M.S.A., Kadir M.Z.A.A., Ali N.H.B.N., Ali Z., Miszaina Osman, et al. Review of thermal stress and condition monitoring technologies for overhead transmission lines: issues and challenges // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 120053–120081. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3004578.

7. Rahman M., Atchison F., Cecchi V. Temperature-dependent system level analysis of electric power transmission systems: a review // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 193. P. 107033. https://doi.org/10.1016 /j.epsr.2021.107033.

8. Lawal O.A., Teh J. Dynamic thermal rating forecasting methods: a systematic survey // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 65193–65205. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3183606.

9. Karimi S., Musilek P., Knight A.M. Dynamic thermal rating of transmission lines: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 91. P. 600–612. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.001.

10. Martinez R., Manana M., Arroyo A., Bustamante S., Laso A., Castro P., et al. Dynamic rating management of overhead transmission lines operating under multiple weather conditions // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 4. P. 1136. https://doi.org/10.3390/en14041136.

11. Xie Xiaowei, Liu Zhengjun, Xu Caijun, Zhang Yongzhen. A multiple sensors platform method for power line inspection based on a large unmanned helicopter // Sensors. 2017. Vol. 17. lss. 6. P. 1222. https://doi.org/10.3390/s17061222.

12. Iglesias J., Watt G., Douglass D., Morgan V., Stephen R., Bertinat M., et al. Guide for thermal rating calculations of overhead lines // CIGRE. 2014. P. 95.

13. Zivkovic M. IEEE Standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors sponsored by the transmission and distribution Committee. New York: IEEE, 2013. 58 p. https://doi.org/10.1109/ IEEESTD.2013.6692858.

14. Петрова Е.В., Гиршин С.С., Криволапов В.А., Горюнов В.Н., Троценко В.М. Анализ длительно допустимых токов и потерь активной мощности в воздушных линиях электропередачи с учетом климатических факторов // Омский научный вестник. 2023. № 4. С. 84–92. https://doi.org/10.25206/1813-8225-2023-188-84-92. EDN: WQGZWB.

15. Liu Yanxin, Sun Jianyu, Chen Shaoping, Sha Jingjie, Yang Juekuan. Thermophysical properties of cross-linked polyethylene during thermal aging // Thermochimica Acta. 2022. Vol. 713. P. 179231. https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179231.

Гиршин С.С., Горюнов В.Н., Петрова Е.В. и др. Контроль температуры токопроводящей жилы защищённых проводов... Girshin S.S., Goryunov V.N., Petrova E.V., et al. Temperature control of aerial current-carrying conductors by insulation surface...

16. Бигун А.Я., Гиршин С.С., Горюнов В.Н., Шепелев А.О., Ткаченко В.А., Троценко В.М. Оценка влияния ветра на нагрев изолированного провода воздушных линий электропередачи // Динамика систем, механизмов и машин. 2020. Т. 8. № 3. С. 23–30. https://doi.org/10.25206/2310-9793-8-3-23-30. EDN: HPGPAX.

17. Liu Zhao, Deng Honglei, Peng Ruidong, Peng Xiangyang, Wang Rui, Zheng Wencheng, et al. An equivalent heat transfer model instead of wind speed measuring for dynamic thermal rating of transmission lines // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 18. P. 4679. https://doi.org/10.3390/en13184679.

18. Sanda M., Kojima T., Higashi E., Maruyama T., Iwama N., Sakai O. Overhead transmission line monitoring system for dynamic rating // SEI Technical Review. 2018. No. 87. P. 64–69.

19. Jagota V., Sethi A.S., Kumar K. Finite element method: an overview // Walailak Journal of Science and Technology. 2013. Vol. 10. Iss. 1. P. 1–8. https://doi.org/10.2004/WJST.V10I1.499.

20. Петрова Е.В. Аналитический метод расчета потерь в воздушных линиях электроэнергетических систем с учетом изменения нагрузки и погодных условий // Омский научный вестник. 2023. № 3. С. 101–108. https://doi.org/ 10.25206/1813-8225-2023-187-101-108. EDN: QJTELW.

References

1. Hasan M.K., Ahmed M.M., Musa S.S., Islam S., Abdullah S.N.H.S., Hossain E. An improved dynamic thermal current rating model for PMU-based wide area measurement framework for reliability analysis utilizing sensor cloud system. *IEEE Access*. 2021;9:14446-14458. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3052368.

2. Lai Ching-Ming, Teh Jiashen. Comprehensive review of the dynamic thermal rating system for sustainable electrical power systems. *Energy Reports*. 2022;8:3263-3288. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.085.

3. El-Azab M., Omran W.A., Mekhamer S.F., Talaat H.E.A. Congestion management of power systems by optimizing grid topology and using dynamic thermal rating. *Electric Power Systems Research*. 2021;199:107433. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107433.

4. Dawson L., Knight A.M. Investigating the impact of a dynamic thermal rating on wind farm integration. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2023;17(4):2449-2457. https://doi.org/10.1049/gtd2.12821.

5. Lai Ching-Ming, Teh Jiashen, Alharbi B., AlKassem A., Aljabr A., Alshammari N. Optimisation of generation unit commitment and network topology with the dynamic thermal rating system considering N-1 reliability. *Electric Power Systems Research*. 2023;221:109444. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109444.

6. Zainuddin N.M., Rahman M.S.A., Kadir M.Z.A.A., Ali N.H.B.N., Ali Z., Miszaina Osman, et al. Review of thermal stress and condition monitoring technologies for overhead transmission lines: issues and challenges. *IEEE Access*. 2020;8:120053-120081. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3004578.

7. Rahman M., Atchison F., Cecchi V. Temperature-dependent system level analysis of electric power transmission systems: a review. *Electric Power Systems Research*. 2021;193:107033. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107033.

8. Lawal O.A., Teh J. Dynamic thermal rating forecasting methods: a systematic survey. *IEEE Access*. 2022;10:65193-65205. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3183606.

9. Karimi S., Musilek P., Knight A.M. Dynamic thermal rating of transmission lines: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;91:600-612. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.001.

10. Martinez R., Manana M., Arroyo A., Bustamante S., Laso A., Castro P., et al. Dynamic rating management of overheadtransmissionlinesoperating under multiple weather conditions. *Energies*. 2021;14(4):1136.https://doi.org/10.3390/en14041136.

11. Xie Xiaowei, Liu Zhengjun, Xu Caijun, Zhang Yongzhen. A multiple sensors platform method for power line inspection based on a large unmanned helicopter. *Sensors*. 2017;17(6):1222. https://doi.org/10.3390/s17061222. 12. Iglesias J., Watt G., Douglass D., Morgan V., Stephen R., Bertinat M., et al. Guide for thermal rating calculations of overhead lines. *CIGRE*. 2014;95.

13. Zivkovic M. IEEE Standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors sponsored by the transmission and distribution Committee. New York: IEEE; 2013, 58 p. https://doi.org/10.1109/ IEEESTD.2013.6692858.

14. Petrova E.V., Girshin S.S., Krivolapov V.A., Goryunov V.N., Trotsenko V.M. The analysis of continuous admissible currents and active power losses in overhead power lines taking into account climatic factors. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023;4:84-92. (In Russ.). https://doi.org/10.25206/1813-8225-2023-188-84-92. EDN: WQGZWB.

15. Liu Yanxin, Sun Jianyu, Chen Shaoping, Sha Jingjie, Yang Juekuan. Thermophysical properties of crosslinked polyethylene during thermal aging. *Thermochimica Acta*. 2022;713:179231. https://doi.org/10.1016/ j.tca.2022.179231.

16. Bigun A.Ya., Girshin S.S., Goryunov V.N., Shepelev A.O., Tkachenko V.A., Trotsenko V.M. Evaluation of the influence of wind on heating of the insulated wire of electric transmission air lines. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2020;8(3):23-30. (In Russ.). https://doi.org/10.25206/2310-9793-8-3-23-30. EDN: HPGPAX.

17. Liu Zhao, Deng Honglei, Peng Ruidong, Peng Xiangyang, Wang Rui, Zheng Wencheng, et al. An equivalent heat transfer model instead of wind speed measuring for dynamic thermal rating of transmission lines. *Energies*. 2020;13(18):4679. https://doi.org/10.3390/en13184679.

18. Sanda M., Kojima T., Higashi E., Maruyama T., Iwama N., Sakai O. Overhead transmission line monitoring system for dynamic rating. *SEI Technical Review*. 2018;87:64-69.

https://ipolytech.elpub.ru -

2025. T. 29. № 1. C. 51-65

ISSN 2782-4004 (print)

2025;29(1):51-65

ISSN 2782-6341 (online)

19. Jagota V., Sethi A.S., Kumar K. Finite element method: an overview. *Walailak Journal of Science and Technology*. 2013;10(1):1-8. https://doi.org/10.2004/WJST.V10I1.499.

20. Petrova E.V. Analytical method for calculating losses in overhead lines of electric power systems taking into account changes in load and weather conditions. *Omsk Scientific Bulletin.* 2023;3:101-108. (In Russ.). https://doi.org/ 10.25206/1813-8225-2023-187-101-108. EDN: QJTELW.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гиршин Станислав Сергеевич,

к.т.н., доцент, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Омский государственный технический университет, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия Stansg@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-0650-1880

Горюнов Владимир Николаевич,

д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой электроснабжения
промышленных предприятий,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия
vladimirgoryunov2016@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-4707-2023

Петрова Елена Владимировна,

старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Омский государственный технический университет, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия evpetrova2000@yandex.ru https://orcid.org/ 0000-0002-7866-5630

Криволапов Владислав Александрович, аспирант.

Омский государственный технический университет, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия KrivolapovVladislav1998@gmail.com

Деев Владислав Александрович,

инженер кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Омский государственный технический университет, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия vlad_deev@inbox.ru

Щербаков Кирилл Сергеевич,

инженер кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Омский государственный технический университет, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия kirya.shcherbakov.01@mail.ru

Николаев Михаил Юрьевич,

к.т.н., доцент, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Омский государственный технический университет, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия munp@yandex.ru https://orcid.org/0000-0002-3046-2092

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stanislav S. Girshin,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Omsk State Technical University, 11 Mira pr., Omsk 644050, Russia ⊠ stansg@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-0650-1880

Vladimir N. Goryunov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Omsk State Technical University, 11 Mira pr., Omsk 644050, Russia vladimirgoryunov2016@yandex.ru https://orcid.org/0000-0002-4707-2023

Elena V. Petrova,

Senior Lecturer of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Omsk State Technical University, 11 Mira pr., Omsk 644050, Russia evpetrova2000@yandex.ru https://orcid.org/0000-0002-7866-5630

Vladislav A. Krivolapov,

Postgraduate Student, Omsk State Technical University, 11 Mira pr., Omsk 644050, Russia KrivolapovVladislav1998@gmail.com

Vladislav A. Deev,

Engineer of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Omsk State Technical University, 11 Mira pr., Omsk 644050, Russia vlad_deev@inbox.ru

Kirill S. Shcherbakov,

Engineer of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Omsk State Technical University, 11 Mira pr., Omsk 644050, Russia kirya.shcherbakov.01@mail.ru

Mikhail Yu. Nikolayev,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Omsk State Technical University, 11 Mira pr., Omsk 644050, Russia munp@yandex.ru https://orcid.org/0000-0002-3046-2092 Гиршин С.С., Горюнов В.Н., Петрова Е.В. и др. Контроль температуры токопроводящей жилы защищённых проводов...

Girshin S.S., Goryunov V.N., Petrova E.V., et al. Temperature control of aerial current-carrying conductors by insulation surface...

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 27.12.2024 г.; одобрена после рецензирования 18.01.2025 г.; принята к публикации 15.02.2025 г.

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

Authors' contribution

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 27.12.2024; approved after reviewing 18.01.2025; accepted for publication 15.02.2025.

iPolytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 66-81

2025;29(1):66-81

POWER ENGINEERING

Научная статья EDN: LFPQGX DOI: 10.21285/1814-3520-2025-1-66-81

A Kolmogorov-Arnold neural networks approach to state of charge estimation and confidence assessment for Li-ion batteries

Minh Hien Dao¹, Van Truong Vo², Fang Liu³, Denis N. Sidorov⁴

^{1,2,4}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

²University of Information and Communication Technology, Thainguyen, Vietnam

³Central South University, Changsha, China

⁴Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia ⁴Harbin Institute of Technology, Harbin, China

Abstract. This study aims to thoroughly examine the potential of the Kolmogorov-Arnold Network (KAN) and its application to improving energy management efficiency, particularly in lithium-ion batteries. The study employs a novel method that utilizes one-dimensional adaptive activation functions parameterized by splines, in contrast to traditional neural networks, where activation functions are fixed. Traditional methods for activation function selection are based on empirical approaches and do not guarantee accurate approximation, potentially leading to suboptimal results. This approach enables the KAN to flexibly adapt to complex data structures, ensuring precise state-of-charge estimation. To objectively evaluate the algorithm's effectiveness, experiments were conducted on real datasets, focusing on analyzing the accuracy of state-of-charge estimation at confidence intervals of 95%, 90%, and 85%. The test results for various charge-discharge cycles demonstrated that the proposed method achieves high accuracy and maintains stability throughout the operation. The proposed method reduces the maximum error by at least 4.26% and significantly improves key performance metrics such as Mean Absolute Error, Root Mean Square Error. Thus, the obtained results confirm the efficiency and innovative nature of the KAN in energy management. This method holds great potential for energy management and can be effectively implemented in areas requiring precise time-series forecasting, including smart home systems, electric vehicles, and industrial devices. Future research will optimize the network architecture and expand its practical applications. Significantly, this method can be flexibly adapted to different types of batteries and energy systems, broadening its applicability in real-world conditions.

Keywords: state of charge, Kolmogorov-Arnold networks, energy storage, neural network, prediction interval

Funding. The work was funded by a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FZZZ-2024-0003), in part by the National Foreign Experts Program of China under Grant DL2023161002L and additionally supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province of China under Grant 2024JJ3033.

For citation: Dao Minh Hien, Vo Van Truong, Liu Fang, Sidorov D.N. A Kolmogorov-Arnold neural networks approach to state of charge estimation and confidence assessment for Li-ion batteries. iPolytech Journal. 2025;29(1):66-81. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-66-81. EDN: LFPQGX.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья УДК 004.896

Подход на основе нейронных сетей Колмогорова-Арнольда к оценке состояния заряда и оценке интервала прогнозирования для литий-ионных аккумуляторов

Минь Хиен Дао¹, Ван Чыонг Во², Фанг Лю³, Д.Н. Сидоров⁴

^{1,2,4}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия ²Университет информационных и коммуникационных технологий, Тхайнгуен, Вьетнам ³Центральный Южный Университет, Чанша, Китай ⁴Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия

⁴Харбинский политехнический университет, Харбин, Китай

Резюме. Цель исследования - детальное изучение потенциала сети Колмогорова-Арнольда и его использование для повышения эффективности управления энергией, в частности в литий-ионных батареях.

© Dao Minh Hien, Vo Van Truong, Liu Fang, Sidorov D.N., 2025 66



Dao Minh Hien, Vo Van Truong, Liu Fang, et al. A Kolmogorov-Arnold neural networks approach to state of charge estimation... Дао Минь Хиен, Во Ван Чыонг, Лю Фанг и др. Подход на основе нейронных сетей Колмогорова-Арнольда к оценке...

В работе применяется новый метод, использующий одномерные адаптивные функции активации, параметризованные сплайнами, в отличие от традиционных нейронных сетей, в которых функции активации фиксированы, их выбор эмпирический и не гарантирует точной аппроксимации, что может привести к неоптимальным результатам. Такой подход позволяет сети Колмогорова-Арнольда гибко адаптироваться к сложным структурам данных, обеспечивая точную оценку уровня заряда. Чтобы объективно оценить эффективность алгоритма, были проведены эксперименты на реальных наборах данных, направленные на анализ точности оценки уровня заряда аккумулятора при доверительных интервалах 95%, 90% и 85%. Результаты испытаний при различных циклах заряда-разряда показали, что предложенный метод достигает высокой точности и сохраняет стабильность в процессе работы. Предлагаемый метод снижает максимальную ошибку как минимум на 4,26% и значительно улучшает такие показатели, как средняя абсолютная ошибка и среднеквадратичная ошибка. Таким образом, полученные результаты подтверждают эффективность и инновационность сети Колмогорова-Арнольда в управлении энергией. Данный метод обладает высоким потенциалом в управлении энергетическими системами и может быть эффективно внедрен в области, требующие точного прогнозирования временных рядов, включая системы умного дома, электромобили и промышленные устройства. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на оптимизации архитектуры сети и расширении ее практического использования. Примечательно, что этот метод может быть гибко адаптирован к различным типам аккумуляторов и энергетических систем, что значительно расширяет его применение в реальных условиях.

Ключевые слова: степень заряда, сеть Колмогорова-Арнольда, накопитель энергии, нейронная сеть, интервал предсказания

Финансирование. Работа была профинансирована за счет гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Проект № FZZ-2024-0003), частично за счет Национальной Программы поддержки иностранных специалистов в Китае (грант DL2023161002L), кроме того была поддержана Фондом естественных наук провинции Хунань (грант 2024JJ3033).

Для цитирования: Дао Минь Хиен, Во Ван Чыонг, Лю Фанг, Сидоров Д.Н. Подход на основе нейронных сетей Колмогорова-Арнольда к оценке состояния заряда и оценке интервала прогнозирования для литий-ионных аккумуляторов. *iPolytech Journal*. 2025. Т. 29. № 1. С. 66–81. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-66-81. EDN: LFPQGX.

INTRODUCTION

In recent years, the Kolmogorov-Arnold Network (KAN) has become an advanced solution in machine learning, especially for complex nonlinear problems. KAN boosts the accuracy of predictive models and enhances the representation and learning capabilities of neural networks, making them better at handling nonlinear relationships in multidimensional data. This development has broadened the applications of KAN across various fields, particularly in estimating the State of Charge (SoC) of Liion batteries.

Accurately estimating the SoC is crucial for effective energy management, optimizing battery performance, and ensuring system reliability [1, 2]. In the context of the rapidly growing electric vehicle and large-scale energy storage systems, accurately determining SoC helps prevent failures, optimize operating costs, and extend the lifespan of equipment. Furthermore, calculating confidence intervals for SoC estimates improves the results' accuracy and reliability and provides a comprehensive assessment tool, aiding in the analysis of KAN's SoC estimation performance in various situations. Many machine learning methods have been researched and developed to tackle the challenges of estimating the SoC. Traditional methods like Feedforward Neural Networks and Long Short-Term Memory (LSTM) networks are widely used because they can effectively handle nonlinear data and time series [3, 4]. Especially in smart grid applications, these methods have played a significant role in optimizing energy distribution and minimizing waste [5].

Building on our previous work [6], this study further explores the potential of KAN in improving the accuracy of SoC estimation. This study builds on the methods and findings of the previous research to extend the application by focusing on real-time SoC estimation for lithium-ion batteries and integrating the confidence assessment method to significantly enhance the model's accuracy, reliability, and transparency.

This paper is structured as follows: Section 2 presents the research's theoretical foundations. Section 3 describes the architecture and functioning principles of KAN in estimating SoC. Section 4 introduces the dataset and experimental methods. Section 5 presents the results and analyzes the key

Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 66-81 2025:29(1):66-81

findings. Finally, Section 6 summarizes the main contributions and suggests directions for future research.

METHODOLOGY

Kolmogorov - Arnold Networks is a novel neural network architecture that replaces traditional Multi-Layer Perceptrons (MLPs). The concept behind KANs originates from the Kolmogorov-Arnold representation theorem [7, 8], while MLPs are based on the universal approximation theorem [9]. These different theoretical foundations have led to variations in how KANs and MLPs handle and represent complex relationships in data.

The Kolmogorov-Arnold representation theorem suggests that any continuous function of multiple variables f, which depends on $x = [x_1, x_2, ..., x_n]$, within a bounded domain, can be decomposed into a finite combination of more straightforward, continuous functions that involve only a single variable. Specifically, a smooth, and continuous multivariate function $f:[0,1]^n \to \mathbb{R}$ can be expressed as a finite superposition of certain univariate functions[10]:

$$f(x) = f(x_1, ..., x_n) = \sum_{q=1}^{2n+1} \Phi_q \left(\sum_{p=1}^n \phi_{q,p} \left(x_p \right) \right), \quad (1)$$

where $\phi_{q,p}: [0,1] \to \mathbb{R}$ and $\Phi_q: \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ denote the so-called outer and inner functions, respectively.

In terms of its structure. а be represented KAN layer can as $\Phi = \{\phi_{q,p}\}, \quad p = 1, 2, \cdots, n_{in}, \quad q = 1, 2, \cdots, n_{out},$ where the functions $\phi_{q,p}$ are parameterized functions with adjustable, learnable parameters. This distinctive structure enables KAN to effectively detect and model complex nonlinear relationships in data, outperforming traditional MLPs.

To maximize the potential of KAN, deeper network architectures have been developed. A KAN with a depth L is formed by stacking multiple KAN layers. The structure of this deeper KAN is represented by an integer array $[n_0, n_1, \cdots, n_L]$, where n_l indicates the number of neurons in the l^{th} layers. Each l^{th} KAN layer, takes an input with a certain number of dimensions and transforms it into an output with n_{l+1} dimensions, effectively converting the input vector from $x_l \in \mathbb{R}^{n_l}$ to $x_{l+1} \in \mathbb{R}^{n_{l+1}}$ [10].

where Φ_l is represents the function matrix corresponding to the l^{th} KAN layer in the network.

The Kolmogorov-Arnold Theorem states that the function f(x) can be represented as a composition of inner and outer function matrices applied directly to the input vector x [11, 12]:

$$f(x) = \Phi_{out} \cdot \Phi_{in} \cdot x, \qquad (3)$$

where $\Phi_{\mbox{\tiny in}}$ is a matrix consisting of univariate functions:

 $\Phi_{\mbox{\tiny out}}$ is a row vector containing univariate functions:

$$\Phi_{out} = \left(\Phi_1(\cdot) \quad \cdot \quad \cdot \quad \Phi_{2n+1}(\cdot) \right).$$
(5)

These matrices represent a Kolmogorov-Arnold layer, which is the KAN's fundamental component by stacking such layers. Thus, a KAN is constructed by layering multiple Kolmogorov-Arnold layers [10]:

$$KAN(x) = \left(\Phi_{L-1} \circ \Phi_{L-2} \circ \cdots \circ \Phi_{0}\right)x.$$
 (6)

The depth of the KAN, defined by the number of layers, enables the network to identify and capture more intricate patterns and relationships within the data. Each KAN layer processes the input x through a series of learnable functions, making the network highly flexible and capable of adapting to various scenarios.

Dao Minh Hien, Vo Van Truong, Liu Fang, et al. A Kolmogorov-Arnold neural networks approach to state of charge estimation... Дао Минь Хиен, Во Ван Чыонг, Лю Фанг и др. Подход на основе нейронных сетей Колмогорова-Арнольда к оценке...

The Kolmogorov-Arnold representation theorem enables the development of new neural network architectures by replacing conventional linear weights with univariate B-spline-based functions, which serve as learnable activation functions. These B-splines are expressed through the basis functions $N_{i,j}(t)$. The Oth-order basis function $N_{i,0}(t)$ is defined as follows [13, 14]:

$$N_{i,0}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } t_i \leq t \leq t_{i+1} \text{ and } t_i < t_{i+1} \text{ . (7)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Higher-order basis functions $N_{i,j}(t)$ are calculated using the recursive formula:

$$N_{i,j}(t) = \frac{t - t_i}{t_{i+j} - t_i} N_{i,j-1}(t) + \frac{t_{i+j+1} - t}{t_{i+j+1} - t_{i+1}} N_{i+1,j-1}(t), \quad (8)$$

where j = 1, 2, ..., p. The B-spline curve is defined by the following equation:

$$\boldsymbol{C}(t) = \sum_{i=0}^{n} \mathbf{P}_{i} \boldsymbol{N}_{i,p}(t), \qquad (9)$$

is called B-spline.

This approach provides flexibility in the design of neural network architecture while also enhancing the KAN model's learning and representational capabilities. It enables the model to handle nonlinear relationships within complex data better.

DATASET DESCRIPTION

This paper explores a Li-ion battery type, using data from Mendeley, specifically the LiPo 5450 mAh battery dataset [15]. This battery is famous for applications requiring high energy and portability while supporting multiple recharges.

The study aims to use this battery to train and test the KAN predictive models and evaluate how well these methods can estimate the battery's SoC and other performance-related parameters. The dataset includes 48 charge-discharge cycles, collected in real-time at 1-second intervals and thoughtfully divided for different purposes within the study.

Additionally, Fig. 1. illustrates the correlation matrix of six indicators, including voltage,



Fig. 1. Correlation matrix chart of the data

Рис. 1. Диаграмма корреляционной матрицы данных

Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 66-81 2025:29(1):66-81

current, temperature, and their corresponding moving average (MA) values. It shows a robust correlation (>0.95) between the original features and their MA values, meaning the MA values accurately reflect the raw data trend. Notably, a moderate negative correlation exists between voltage and current (around -0.44 to -0.47). At the same time, temperature has a weak correlation with both voltage and current (with correlation coefficients ranging from -0.35 to 0.1). The MA filter in this study plays a crucial role in eliminating noise and shortterm signal fluctuations, especially when data is collected at a high frequency (once per second). MA helps smooth out sudden variations

in voltage, current, and temperature, thereby providing more apparent trends for KAN predictive models while enhancing the reliability of battery SoC estimation.

Each data sample collected provides three basic input parameters: temperature, voltage, and current, which help define the operating conditions of the energy storage device. However, to improve the quality and accuracy of predictions, the dataset was further expanded with additional parameters like moving average voltage, moving average current, and moving average temperature, as illustrated in Fig. 2. This not only helps reduce noise in the data but also highlights key trends, thereby en-



Fig. 2. Time series analysis chart: voltage, current, and temperature using a moving average filter **Puc. 2.** График анализа временного ряда: напряжение, ток и температура с использованием фильтра скользящего среднего

Dao Minh Hien, Vo Van Truong, Liu Fang, et al. A Kolmogorov-Arnold neural networks approach to state of charge estimation... Дао Минь Хиен, Во Ван Чыонг, Лю Фанг и др. Подход на основе нейронных сетей Колмогорова-Арнольда к оценке...

hancing the stability and accuracy of the model when assessing the performance of energy storage devices.

KOLMOGOROV-ARNOLD NETWORKS FOR STATE OF CHARGE ESTIMATION

Let us consider the application of the KANs network to the SoC estimation problem using the LiPo 5450mAh Battery dataset, as illustrated in Fig. 3. The dataset includes six input variables: temperature, voltage, current, moving average voltage, moving average current, and moving average temperature, with the SoC.

The relationship between the inputs and the SoC can be described by a multivariable function as follows [16]:

$$SoC \approx F(T; V; C; T_{MA}; V_{MA}; C_{MA}),$$
 (10)

where T is temperature , V is voltage, C is current, $T_{\rm MA}$ is moving average temperature, $V_{\rm MA}$ is moving average voltage, $C_{\rm MA}$ is moving average current.

According to the Kolmogorov-Arnold Theorem, this multivariable function can be expressed as a composition of univariate functions that depend independently on individual features:

$$X = f(\phi_{T}(T) + \phi_{V}(V) + \phi_{C}(C) + \phi_{T_{MA}}(T_{MA}) + \phi_{V_{MA}}(V_{MA}) + \phi_{C_{MA}}(C_{MA})),$$
(11)

where X is the representation of univariate functions that reflect the influence of each input variable, ϕ_T is the function representing the influence of T, ϕ_V is the function representing the influence of V, ϕ_C is the function representing the influence of $C, \phi_{T_{MA}}$ is the function representing the influence of $T_{MA}, \phi_{V_{MA}}$ is the function representing the influence of $V_{MA}, \phi_{C_{MA}}$ is the function representing the influence of C_{MA} .

More generally, the relationship can be extended across multiple functions:

$$Y = \sum_{p=1}^{m} f_{p}(\phi_{T_{p}}(T) + \phi_{V_{p}}(V) + \phi_{C_{p}}(C) + \phi_{T_{p,MA}}(T_{MA}) + \phi_{V_{p,MA}}(V_{MA}) + \phi_{C_{p,MA}}(C_{MA})),$$
(12)

where Y is the sum of multiple nonlinear functions that describe the general relationship between the input variables and the SoC value to be estimated, m is the number of functions f_p that aggregate the input factors, f_p is nonlinear functions. ϕ is the univariate functions depend on each input variable, $T,V,C,T_{MA},V_{MA},C_{MA}$ is the input variables.



Fig. 3. Kolmogorov-Arnold network architecture for the State of Charge **Рис. 3.** Архитектура сети Колмогорова-Арнольда для состояния заряда
iPolytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 66-81 2025;29(1):66-81

ISSN 2782-6341 (online)

CONFIDENCE INTERVAL

In addition to predicting the SoC as a single value, we also make predictions within a confident interval. We assume that future observed values and prediction errors follow a normal distribution. Below is the formula for calculating the confidence interval [17, 18]:

$$y_{\text{int}\,erval} = \hat{y} \pm z_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \sigma,$$
 (13)

where $\mathcal{Y}_{\text{interval}}$ is the confidence interval of the output variable, $\hat{\mathcal{Y}}$ is the value of the point estimated result, $\frac{z_{\alpha}}{2}$ is normal distribution

value, σ is the standard deviation of the estimated distribution.

The value of σ is estimated through the estimation error, called the residual (e_i) , with n representing the number of observation, as follows [19]:



The process of building a model to estimate SoC using KANs is carried out through several steps, as illustrated in Fig. 4. First, the data is meticulously prepared, including validation, cleaning (removing NAN values), and normalization. Then, the dataset is divided into two parts: 65% for training, 15% for validation, and the remaining 20% for testing. Next, key feature vectors such as voltage, current, and temperature are identified to capture relationships within the data.

In step three, the KAN network architecture is designed with the integration of B-spline activation functions to enhance the accuracy of SoC estimation. Step four focuses on training and validating the model by



Fig. 4. Diagram of the training process using Kolmogorov-Arnold networks

Рис. 4. Диаграмма процесса обучения с использованием сетей Колмогорова-Арнольда

Dao Minh Hien, Vo Van Truong, Liu Fang, et al. A Kolmogorov-Arnold neural networks approach to state of charge estimation... Дао Минь Хиен, Во Ван Чыонг, Лю Фанг и др. Подход на основе нейронных сетей Колмогорова-Арнольда к оценке...

optimizing the B-spline functions and network parameters. Subsequently, the model is evaluated and fine-tuned based on performance metrics such as Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and MAX_Error. Step six involves visualizing the results by comparing predicted values with actual values.

The final stage involves calculating and providing the upper and lower confidence intervals of the estimated SoC. This helps determine the reliability of the estimates, allowing the prediction of potential fluctuation ranges of the SoC under different operating conditions, thereby assessing the system's performance and stability.

The battery SoC processing and prediction pipeline has five main stages, as illustrated in Fig. 5. First, in Stage 1 (Input Data Sources), the raw battery data is divided into two groups: the feature group (including current, voltage, and temperature) and the SoC label, a key element in data preprocessing and model training. Next, in Stage 2 (Data Preparation Phase), the data undergoes preprocessing steps such as cleaning, removing NaN values, normalization, and applying a moving average filter to improve signal quality. Afterward, the dataset is split into three parts: training (65%), validation (15%), and testing (20%).

Once the data is prepared, Stage 3 (Training) focuses on training the KAN model, the system's core component, using the Backpropagation algorithm to optimize the Loss function. Upon completion of training, Stage 4 (Final Outputs) generates two key outputs: the estimated SoC and its corresponding confidence interval. Finally, in Stage 5 (Testing), the model's performance is evaluated using



Fig. 5. State of Charge estimation architecture diagram Рис. 5. Диаграмма архитектуры оценки состояния заряда two main groups of metrics: Relative Error Metrics (R-squared, NMAE) and Error Metrics (RMSE, MAE, Max Absolute Error, and Error

Polytech Journal

SoC). The training process is thorough in the training block, where the KAN network, the core component, takes in the features and labels to calculate the loss. Once training is finished, the model provides two main outputs: an SoC estimate and confidence intervals. In parallel, the testing set is used to assess the model's accuracy through metrics like R-squared, NMAE (Relative error metrics) and RMSE, MAE, and Max Absolute Error (Error metrics).

This structured approach ensures a systematic transition from raw input data to final results, with built-in validation and assessment steps. The clear separation of stages allows for effective tracking, maintenance, and optimization of each system component, ensuring orderly and efficient operation.

RESULTS AND DISCUSSION

. . .

This study used the KAN network model [20] to train and estimate the SoC for a 5450 mAh LiPo battery. We use various metrics like RMSE, MAE, NMAE, Max Abs Error, and SoC error rate (%) to assess the model's effectiveness.

The test results presented in Table 1 and Fig. 6 show that the KAN model performed well when predicting point. The model achieved low values in MAE and RMSE, and the high R-squared value reflects its superior accuracy. Additionally, the model demonstrated stability during the prediction process, as the NMAE and MAX Abs Error indicate the reliability of the prediction results.

The error charts in Fig. 7 show that the KAN model maintains high stability through-

... .

out the prediction process, with small and consistent error fluctuations, especially within 0 to 100,000 samples. Overall, with superior performance across all evaluation metrics, the KAN model accurately estimates the state of charge of the battery accurately.

An essential part of the study is determining the confidence intervals for the SoC estimates. This enhances the accuracy and reliability of the results and allows for a more detailed assessment of the KAN model's performance. Through this, we can evaluate the reliability of the estimates and identify the expected SoC range under different operating conditions, contributing to a better understanding of the system's stability, as shown through the evaluation metrics in Fig. 14.

The estimation results with 95, 90, and 85% confidence levels, as presented in Tables 2, 3, and 4, indicate that forecast intervals were applied every 1200 steps.



Fig. 6. Performance metrics of Kolmogorov-Arnold Network

models to predict point **Рис. 6.** Метрики производительности моделей сети Колмогорова-Арнольда для прогнозирования по точкам

lable 1. Erro	or table of	Kolmogorov-Arno	old Network m	odels to pre	edict point			
Таблица 1.	Таблица о	шибок моделей	сети Колмого	рова-Арно/	льда для пр	огнозирова	ния по то	эчкам

.

Index	KAN network
R-squared	0.9987
RMSE	0.98
MAE	0.69
NMAE, %	1.41
MAX Abs Error	4.26





Fig. 7. Experimental results with Kolmogorov-Arnold Network Рис. 7. Экспериментальные результаты с сетью Колмогорова-Арнольда

The number of future prediction points was set to 200, with a window size 1200. These parameters help determine the potential fluctuation range of SoC under different operating conditions, enhancing the system's stability assessment. Specifically, in the confidence interval analysis, the model demonstrated high reliability, with 86.41% of actual data falling within the estimated range at a 95% confidence level (Fig. 8 and 9), 81.84% at a 90% confidence level (Fig. 10 and 11) and maintaining 79.16% at an 85% confidence level (Fig. 12 and 13).

• With 95% confidence interval:

 Table 2. Kolmogorov-Arnold Network State of Charge results with 95% confidence interval

аблица 2. Результаты состояния заряда сети Колмогорова-Арнольда с доверительным интервалом 95%					
Index	Evaluate the lower bound estimates	Evaluate upper bound estimates			
R-squared	0.9947	0.9952			
RMSE	2.15	1.87			
MAE	1.84	1.40			
NMAE [%]	3.77	2.87			
MAX Abs Error	6.66	7.24			





Fig. 8. Model performance metrics chart with 95% confidence Interval **Рис. 8.** График метрик производительности модели с доверительным интервалом 95%



Fig. 9. Battery State of Charge Estimation with 95% Confidence Interval **Рис. 9.** Оценка состояния заряда аккумулятора с доверительным интервалом 95%

• With 90% confidence interval:

Table 3. Kolmogorov-Arnold Network State of Charge results with 90% confidence Interval	
Таблица 3. Результаты состояния заряда сети Колмогорова-Арнольда с доверительным интервалом 9	0%

Index	Evaluate the lower bound estimates	Evaluate upper bound estimates		
R-squared	0.9951	0.9968		
RMSE	1.97	1.66		
MAE	1.59	1.31		
NMAE [%]	3.26	2.68		
MAX Abs Error	6.39	6.20		
Percentage of actual data within the estimation interval: 91.94%				





Fig. 10. Model performance metrics chart with 90% confidence interval **Рис. 10.** График метрик производительности модели с доверительным интервалом 90% Dao Minh Hien, Vo Van Truong, Liu Fang, et al. A Kolmogorov-Arnold neural networks approach to state of charge estimation... Дао Минь Хиен, Во Ван Чыонг, Лю Фанг и др. Подход на основе нейронных сетей Колмогорова-Арнольда к оценке...



Fig. 11. Battery State of Charge estimation with 90% confidence interval **Рис. 11.** Оценка состояния заряда аккумулятора с доверительным интервалом 90%

• With 85% confidence interval:

Table 4. Kolmogorov-Arnold Network State of Charge results with 85% confidence interval	
Таблица 4. Результаты состояния заряда сети Колмогорова-Арнольда с доверительным интервалом 85%	6

Index	Evaluate the lower bound estimates	Evaluate upper bound estimates		
R-squared	0.9937	0.9962		
RMSE	1.89	1.52		
MAE	1.54	1.22		
NMAE [%]	3.16	2.50		
MAX Abs Error	6.20	6.20		
Percentage of actual data within the estimation interval: 79.16%				



Fig. 12. Model performance metrics chart with 85% confidence interval *Рис. 12.* График метрик производительности модели с доверительным интервалом 85%



Fig. 13. Battery State of Charge estimation with 85% confidence interval Рис. 13. Оценка состояния заряда аккумулятора с доверительным интервалом 85%



78

Dao Minh Hien, Vo Van Truong, Liu Fang, et al. A Kolmogorov-Arnold neural networks approach to state of charge estimation... Дао Минь Хиен, Во Ван Чыонг, Лю Фанг и др. Подход на основе нейронных сетей Колмогорова-Арнольда к оценке...



Fig. 14. Performance metrics: bounds estimation with 95% (a), 90% (b) and 85% (c) confidence interval **Рис. 14.** Метрики производительности: оценка границ с доверительными интервалами 95% (a), 90% (b) и 85% (c)

Above, we analyzed the results of the KAN neural network method combined with a confidence interval to assess the accuracy and reliability of the state of charge estimates for lithium-ion batteries. At the same time, we highlighted this method's advantages and disadvantages. Next, we will move on to the conclusion.

CONCLUSION

The results from our experiments indicate that the KAN Network can estimate the SoC with greater accuracy. Moreover, KAN has shown remarkable effectiveness in generating prediction intervals, as a significant portion of actual values falls within these estimated ranges. This capability boosts the reliability and stability of SoC predictions, making them more dependable. However, to maximize the potential of KAN and minimize the risk of overfitting, it's crucial to adjust the network's architecture and activation functions carefully. This fine-tuning becomes especially important when dealing with smaller datasets or more complex modeling scenarios. Looking ahead, we aim to broaden our research by integrating KAN with other types of neural networks, such as LSTM and possibly Transformer architecture. along with various traditional neural models. Our objective is to create a hybrid model that delivers the highest level of performance for estimating SoC in energy storage systems.

References

1. Chen Zhilong, He Ting, Mao Yingzhe, Zhu Wenlong, Xiong Yifeng, Wang Shen, et al. State of charge estimation method of energy storage battery based on multiple incremental features. *Journal of The Electrochemical* Society. 2024;171(7):070522. https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad5efa.

2. Hu Xiaosong, Jiang Jiuchun, Cao Dongpu, Egardt B. Battery health prognosis for electric vehicles using sample entropy and sparse bayesian predictive modeling. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016;63(4):2645-2656. https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2461523.

3. Bockrath S., Rosskopf A., Koffel S., Waldhör S., Srivastava K., Lorentz V.R.H. State of charge estimation using recurrent neural networks with long short-term memory for lithium-ion batteries. In: *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.* 14–17 October 2019, Lisbon. Lisbon: IEEE; 2019, p. 2507-2511. https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8926815.

4. Tian Jinpeng, Chen Cheng, Shen Weixiang, Sun Fengchun, Xiong Rui. Deep learning framework for lithium-ion battery state of charge estimation: recent advances and future perspectives. *Energy Storage Materials*. 2023;61:102883. https://doi.org/10.1016/j.ensm.2023.102883.

5. Dreglea A., Foley A., Häger U., Sidorov D., Tomin N. Hybrid renewable energy systems, load and generation forecasting, new grids structure, and smart technologies. In: Solving Urban Infrastructure Problems Using Smart City Technologies. 2021;475-484. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816816-5.00022-X. 2025:29(1):66-81

Polytech Journal

ISSN 2782-6341 (online)

6. Dao M.H., Liu F., Sidorov D.N. Kolmogorov–Arnold Neural Networks Technique for the state of charge estimation for li-ion batteries. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software.* 2024;14(4):22-31. https://doi.org/10.14529/mmp240402.

7. Kolmogorov A.N. On the representation of continuous functions of many variables by superposition of continuous functions of one variable and addition. *Doklady Akademii Nauk* SSSR. 1957;114(5):953-956.

8. Arnold V.I. On the representation of continuous functions of three variables as superpositions of continuous functions of two variables. *Doklady Akademii Nauk* SSSR. 1957;114(4):679-681.

9. Hornik K., Stinchcombe M., White H. Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks*. 1989;2(5):359-366. https://doi.org/10.1016/0893-6080(89)90020-8.

10. Liu Ziming, Wang Yixuan, Vaidya S., Ruehle F., Halverson J., Soljačić M., et al. KAN: Kolmogorov-Arnold networks. In: *arXiv*:2404.19756. 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.19756.

11. Peng Yanhong, Wang Yuxin, Hu Fangchao, He Miao, Mao Zebing, Huang Xia, et al. Predictive modeling of flexible EHD pumps using Kolmogorov-Arnold networks. *Biomimetic Intelligence and Robotics*. 2024;4(4):100184. https://doi.org/10.1016/j.birob.2024.100184.

12. Yang Xingyi, Wang Xinchao. Kolmogorov-Arnold transformer. *arXiv*:2409.10594. 2024. https://doi.org/ 10.48550/arXiv.2409.10594.

13. De Boor C. A practical guide to splines. *Mathematics of Computation*. 1980;34(149):325-326. https://doi.org/10.2307/2006241.

14. Fakhoury D., Fakhoury E., Speleers H. ExSpliNet: an interpretable and expressive spline-based neural network. *Neural Networks*. 2022;152:332-346. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2022.04.029.

15. Sapra H.D., Elfimova O., Upadhya S., Desorcy L., Wagner M., Venkataraman S., et al. Battery SoC estimation: updated artifact. *Zenodo*. 2023;1:0522. https://doi.org/10.5281/zenodo.7553043.

16. Dao M.H., Sidorov D.N. Estimation of the state of charge of energy storage devices using Kolmogorov–Arnold networks. In: *Dynamic Systems and Computer Sciences: Theory and Applications (DYSC 2024): Proceedings of the* 6th International Conference. 2024;206-209. https://doi.org/10.26516/978-5-9624-23098.2024.1-224.

17. Vo Van Truong, Sidorov D.N. Prediction interval for solar photovoltaic power using arimax model. In: Dynamic Systems and Computer Sciences: Theory and Applications (DYSC 2023): Proceedings of the 5th International Conference. 22 September 2023, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk State University; 2023, p. 225-228. https://doi. org/10.26516/978-5-9624-2182-7.2023.1-228.

18. Hundman R.J., Athanasopolos G. Forecasting: principles and practice. 2nd ed. Monash University, 2018. Available from: https://otexts.com/fpp2/ [Accessed 17th September 2024].

19. Shrestha D.L., Solomatine D.P. Machine learning approaches for estimation of prediction interval for the model output. *Neural Networks*. 2006;19(2):225-235. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2006.01.012.

20. Kolmogorov A.N., Arnold V.I. Kolmogorov-Arnold networks (KANs). *GitHub*. Available from: https://github.com/ KindXiaoming/pykan [Accessed 17th September 2024].

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Minh Hien Dao,

PhD Student, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia dmhien@ex.istu.edu

Van Truong Vo,

PhD Student,

Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia University of Information and Communication Technology, Thai Nguyen University, Z115 St., Quyet Thang Commune, Thainguyen City, Thainguyen Prov. 250000, Vietnam vvtruong@ictu.edu.vn

Fang Liu,

Professor,

School of Automation, Central South University, 932 Lushan South Road, Yuelu District, Changsha, Hunan 410083, P.R. China csuliufang@csu.edu.cn

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дао Минь Хиен,

аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия dmhien@ex.istu.edu

Во Ван Чыонг,

аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия; Университет информационных и коммуникационных технологий, Университет Тхайнгуен, 250000, г. Тхайнгуен, ул. Z115, Вьетнам vvtruong@ictu.edu.vn

Лю Фанг,

профессор, Школа автоматизации, Центральный Южный Университет, 410083, г. Чанша, ул. Южный Лушань, 932, Китай csuliufang@csu.edu.cn Dao Minh Hien, Vo Van Truong, Liu Fang, et al. A Kolmogorov-Arnold neural networks approach to state of charge estimation... Дао Минь Хиен, Во Ван Чыонг, Лю Фанг и др. Подход на основе нейронных сетей Колмогорова-Арнольда к оценке...

Denis N. Sidorov,

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Russian Academy of Sciences, Professor of the Industrial Mathematics Laboratory of the Baikal School of BRICS. Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia; Chief Researcher. Applied Mathematics Department No. 90, Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia; Chair Professor at the School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, 92 West Dazhi St., Nangang Dist., Harbin, Heilongjiang Prov. 150001, China ⊠ sidorovdn@ex.istu.edu https://orcid.org/0000-0002-3131-1325

Authors' contribution

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 he 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 03.11.2024; approved after reviewing 09.01.2025; accepted for publication 12.02.2025.

Сидоров Денис Николаевич,

д-р физ.-мат. наук, профессор РАН, профессор Лаборатории промышленной математики БИ БРИКС, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия; ведуший научный сотрудник Отдела прикладной математики № 90, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской Академии наук, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия; профессор-председатель факультета электротехники и автоматизации, Харбинский технологический университет, 150001, г. Харбин, район Наньган, ул. Западный Дажи, 92, Китай Sidorovdn@ex.istu.edu https://orcid.org/0000-0002-3131-1325

Заявленный 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 03.11.2024 г.; одобрена после рецензирования 09.01.2025 г.; принята к публикации 12.02.2025 г.

iPolytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 82-95 2025;29(1):82-95

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья УДК 621.383 **EDN: IAXHRB** DOI: 10.21285/1814-3520-2025-1-82-95

Обнаружение потенциальных неисправностей фотоэлектрических модулей в реальных условиях эксплуатации по их вольт-амперным характеристикам

И.М. Кирпичникова¹, В.А. Заварухин², В.А. Серов³

¹⁻³Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Резюме. Цель - провести экспериментальное исследование по локализации возможных дефектов фотоэлектрического модуля, оперируя данными полученных вольт-амперных характеристик. Исследование реакции фотоэлектрического модуля на изменение внешних и внутренних факторов в условиях городской среды г. Челябинск. Для проведения измерений и контроля состояния модуля использовался программный комплекс IV Swinger 2, считывающий данные с модуля для построения вольт-амперных характеристик и определения точки максимальной мощности в режиме реального времени. Имитация изменения внутренних параметров модуля производилась при помощи подключения добавочных сопротивлений разного номинала к внешним выводам модуля, установленным для проведения экспериментов. В результате проведенных исследований была показана связь между изменением формы вольт-амперной характеристики фотоэлектрического модуля и добавочным сопротивлением, включаемым как последовательно, так и параллельно в различные участки электрической цепи модуля. Сопротивление имитирует основные неисправности согласно приведенной классификации. Установлено, что при наличии добавочного сопротивления в цепи ячеек момент перехода шунтирующего диода в проводящее состояние соответствовал интервалу значений от 0.71 до 1.06 Ом, в то время как при добавочном сопротивлении в цепи между модулями сопротивление может расти в широком диапазоне значений и диод не перейдет в проводящее состояние. Установлено, что наличие добавочного сопротивления способно снизить генерацию фотоэлектрического модуля. Оценено влияние различного уровня затенения ячеек на выработку энергии модулем. Установлено, что при наличии результирующего шунтирующего сопротивления для всех ячеек одного модуля угол наклона характеристики растет по мере уменьшения сопротивления, так как растут токи утечки. Таким образом, оперируя данными вольт-амперных характеристик и угла наклона вблизи точек максимальной мощности, можно проанализировать и выявить возникающие неисправности фотоэлектрического модуля и провести оценку значения его сопротивления.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, вольт-амперная характеристика, добавочное сопротивление, дефекты, деградация

Для цитирования: Кирпичникова И.М., Заварухин В.А., Серов В.А. Обнаружение потенциальных неисправностей фотоэлектрических модулей в реальных условиях эксплуатации по их вольт-амперным характеристикам // iPolytech Journal. 2025. T. 29. № 1. C. 82–95. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-82-95. EDN: IAXHRB.

POWER ENGINEERING

Original article

I-V curves for detecting faults of operating photovoltaic modules

Irina M. Kirpichnikova¹, Vladimir A. Zavarukhin², Viktor A. Serov³

¹⁻³South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The present paper focuses on I-V curves for localizing possible defects in a photovoltaic module. The study considers the response of a photovoltaic module to changes in external and internal factors of the urban environment in Chelyabinsk, Russian Federation. To carry out measurements and control the module condition, we use the IV Swinger 2 software package reading data from the module to plot I-V curves and determine the maximum power point in real time. Changes in the internal parameters of the module are simulated by connecting additional resistances of different values to the external terminals of the experimental module. The conducted research has demonstrated additional resistance changing the shape of the I-V curve of the photovoltaic module regardless the type of connection and electrical circuit section of the module. This resistance simulates the main faults according to the given classification. Additional resistance in the cell circuit makes the shunt diode a conductor in the range





Кирпичникова И.М., Заварухин В.А., Серов В.А. Обнаружение потенциальных неисправностей фотоэлектрических... Kirpichnikova I.M., Zavarukhin V.A., Serov V.A. I-V curves for detecting faults of operating photovoltaic modules...

of values from 0.71 to 1.06 Ohm. If additional resistance is installed between modules, the resistance can increase in a wide range of values without the diode transition to the conducting state. Additional resistance can reduce the power generation of a photovoltaic module. Therefore, we have assessed the impact of different cell shading levels on the module power generation. Given the resulting shunt resistance for all cells of one module, the slope of the I-V curve is inversely proportional to resistance due to the increased current leakage. Thus, the data of the I-V curve and the slope angle near the maximum power points is appropriate to identify and analyze the emerging faults of the photovoltaic module by evaluating its resistance.

Keywords: photovoltaic module, I-V characteristic, additional resistance, faults, degradation

For citation: Kirpichnikova I.M., Zavarukhin V.A., Serov V.A. I-V curves for detecting faults of operating photovoltaic modules. *iPolytech Journal.* 2025;29(1):82-95. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-82-95. EDN: IAXHRB.

введение

В процессе эксплуатации фотоэлектрических модулей (ФЭМ) происходит изменение как их физических, так и энергетических параметров. В первом случае речь идет об изменениях параметров отдельных элементов, узлов или деталей модулей, вызванных, например, их деградацией. Изменение энергетических параметров отражается на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) модулей, которое обусловлено не только колебаниями уровня и равномерности солнечной освещенности, но и температурой окружающей среды [1, 2].

Снижение эффективности ФЭМ является одной из ключевых проблем в сфере возобновляемой солнечной энергетики. Эффективность работы фотоэлектрических модулей колеблется в пределах 14-23% по причине наличия в солнечном свете широкого спектра фотонов различных длин волн. В процессе генерации энергии используется лишь видимая часть спектра электромагнитной волны, в то время как инфракрасная составляющая, которая представляет значительную долю солнечного излучения, поглощается кремниевыми пластинами, но не преобразуется в электричество, а лишь нагревает модуль. Нагрев полупроводниковых элементов внутри модуля приводит к снижению их эффективности. Это связано с тем, что при повышении температуры увеличивается вероятность рекомбинации электронно-дырочных пар, что снижает выходной ток модуля.

Кроме того, существуют дополнительные факторы, влияющие на снижение эффективности ФЭМ [3], такие как:

1) отражение – часть солнечного света отражается от поверхности модуля и не достигает фотоэлементов;

2) потери на соединениях – соединения между различными элементами модуля могут обладать сопротивлением, что приводит к потерям энергии; 3) потери от затенения – даже незначительное затенение способно существенно уменьшить производительность модуля;

4) деградация – с течением времени эффективность ФЭМ может снижаться из-за естественного старения материалов, загрязнения поверхности и других факторов.

На сегодняшний день ученые оценивают максимальный уровень достижения эффективности ФЭМ, равный 68% [4]. Получение такого значения пока возможно только в результате лабораторных испытаний при соблюдении многих параметров, это:

 оптимальный угол наклона поверхности модуля;

- длина волны солнечного света;

- высокий уровень освещенности.

Если принимать во внимание естественные параметры окружающей среды и степень деградации со временем, то эффективность у реального ФЭМ на порядок снизится по сравнению с лабораторным образцом.

Обычный темп деградации большинства моделей составляет 0,3–0,8% в год [4, 5]. Однако исследования [6, 7] показывают, что минимальная скорость деградации исследуемых опытных образцов составила 0,79% в год, а максимальная – 1,67%. Этот показатель в ряде случаев остается зависимым от вида деградации, который влияет на скорость процесса и может значительно сократить срок эффективной работы ФЭМ [3, 8]. Все модули подвержены деградации, но скорость процесса зависит от условий эксплуатации и конкретного случая. При этом важно учитывать тип деградации при оценке срока службы реального ФЭМ.

Целью работы является экспериментальное определение возможных неисправностей/дефектов фотоэлектрического модуля методом сравнительного анализа с использованием текущих показаний его вольт-амперных характеристик.

https://ipolytech.elpub.ru ·

Polytech Journal

Повышение эффективности работы ФЭМ является одной из ключевых задач развития солнечной энергетики нашей страны и направлением дальнейших научно-исследовательских работ. Решение этих задач позволит снизить стоимость электроэнергии, полученной из солнечного света, и сделать солнечную энергетику более конкурентоспособной на энергетическом рынке.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводились в сентябре 2024 г. в центре г. Челябинск, имеющего географические координаты: северная широта – 55,162°; долгота – 61,369°. Температура воздуха во время эксперимента составляла 21°С, уровень солнечной инсоляции равнялся примерно 750– 800 Вт/м².

Было принято допущение, что для ясного солнечного дня возможен уровень затенения от рассеянных облаков и выбросы от промышленных предприятий. В течение эксперимента фотоэлектрический преобразователь был установлен под углом наклона 57,7° (что представляет собой приближенное значение в соответствии с географической широтой г. Челябинск, равной 55°) и ориентирован на юг (рис. 1 *b*). Измерение температуры модуля производилось с применением рекомендаций, изложенных в ГОСТ Р МЭК 60891-2013⁴. Согласно измерениям, средняя температура ячеек модуля составила 42,5°С (рис. 1 *с*).

Параметры фотоэлектрического модуля BSP 32-100 $^{\rm 5}$ BSP 32-100 $^{\rm 5}$ photovoltaic module parameters

Исследования проводились на фотоэлектрическом модуле BSP 32-100 (рис. 1 *a*) китайского производства (таблица) [9]. Перед началом эксперимента поверхность модуля очищалась.



Рис. 1. Образец и условия проведения эксперимента для снятия вольт-амперных характеристик солнечного модуля: а – солнечный модуль BSP 32-100; b – угол наклона модуля к горизонту; с – пирометр PCE SCANTEMP 490 **Fig. 1.** Sample and setting conditions of the experiment for measuring I-V characteristics of the solar module: a – BSP 32-100 solar module; b – module inclination angle to the horizon; c – PCE SCANTEMP 490 pyrometer

Параметр	Условное обозначение	Значение параметра
Напряжение холостого хода	U _{xx}	19,2 B
Ток короткого замыкания	I _{K3}	6,68 A
Напряжение в точке максимальной мощности	U _{MM}	16 B
Ток в точке максимальной мощности	I _{MM}	6,25 A
Температурный коэффициент по току	Kı	0,036 %/ °C
Температурный коэффициент по напряжению	Κu	-0,31 %/°C

⁴ГОСТ Р МЭК 60891-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Приборы фотоэлектрические. Методики коррекции по температуре и энергетической освещенности результатов измерения вольт-амперной характеристики. Введ. 01.07.2015. М.: Стандартинформ, 2015.

ISSN 2782-6341 (online)

⁵Солнечная панель модели BSP 32-100 бренда JINGYANGPV. Режим доступа: https://aliexpress.ru/store/4433198?spm= a2g2w.detail.100005.1.28a565a1r22zC6&_ga=2.190830251.1872709940.1652500190-1697940568.1652500190 (дата обращения: 30.09.2024).

Кирпичникова И.М., Заварухин В.А., Серов В.А. Обнаружение потенциальных неисправностей фотоэлектрических... Kirpichnikova I.M., Zavarukhin V.A., Serov V.A. I-V curves for detecting faults of operating photovoltaic modules...

В стандартном ФЭМ солнечные элементы электрически соединены последовательно. Такая конфигурация приводит к формированию высокого напряжения в цепи модуля. Однако следует отметить, что сила тока, протекающая через каждый из подключенных элементов, остается неизменной.

Для проведения экспериментального исследования модуль BSP 32-100, содержащий 32 ячейки, был разделен на две идентичные секции по 16 ячеек. В каждую секцию был интегрирован один шунтирующий диод с рабочим током до 15 А и напряжением до 50 В для обеспечения байпасного соединения (рис. 2). С помощью специально смоделированных выводов, для подключения к электрической



Рис. 2. Принципиальная схема модуля BSP 32-100 для испытаний

Fig. 2. Schematic diagram of the BSP 32-100 module for testing

цепи были созданы условия, имитирующие различные типы неисправностей модуля.



Рис. 3. Контрольная вольт-амперная характеристика модуля BSP 32-100 **Fig. 3.** Control I–V characteristic of the BSP 32-100 module

2025;29(1):82-95

ISSN 2782-6341 (online)

Во время испытаний для считывания параметров и построения вольт-амперной характеристики модуля использовалась программа «IV Swinger 2»⁶.

iPolytech Journal

Полученная характеристика исследуемо-

го ФЭМ (рис. 3) в дальнейшем использовалась как контрольная [10].

Порядок получения экспериментальных данных различных видов неисправностей ФЭМ изображен на рис. 4.



⁶IV Swinger 2 – PCB (PV Module, SSR). Режим доступа: https://www.instructables.com/IV-Swinger-2-PCB-PV-Module-SSR/ (дата обращения: 30.09.2024).

Кирпичникова И.М., Заварухин В.А., Серов В.А. Обнаружение потенциальных неисправностей фотоэлектрических... Kirpichnikova I.M., Zavarukhin V.A., Serov V.A. I-V curves for detecting faults of operating photovoltaic modules...

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования проводились в соответствии с разработанным алгоритмом для различных вариантов подключения добавочных сопротивлений.

Добавочное сопротивление в цепи ячеек фотоэлектрического модуля. В ходе эксперимента все 32 ячейки ФЭМ функционировали в нормальном режиме. Для моделирования повреждения межсекционного соединения было применено дополнительное сопротивление на искусственном участке связи двух секций по 16 ячеек (рис. 5). Такой подход позволяет имитировать нарушение контакта между ячейками, которое может возникнуть в реальных условиях эксплуатации вследствие окисления или механических повреждений [11, 12].

Данный эксперимент наглядно иллюстрирует принцип функционирования байпасного (шунтирующего) диода с добавочным сопротивлением в цепи 20 Ом. При достижении критического значения сопротивления ток перенаправляется через диод (рис. 6).



Рис. 5. Принципиальная схема модуля с добавочным сопротивлением в цепи ячеек **Fig. 5.** Schematic diagram of the module with an additional

Fig. 5. Schematic diagram of the module with an additional resistance in the cell circuit

Экспериментальные результаты подтвердили теоретические предположения. При достижении определенного значения добавочного сопротивления (в данном случае 20 Ом, см. рис. 6) открывается байпасный диод и шунтирует соответствующий участок модуля. В результате функционируют оставшиеся 16 ячеек ФЭМ. При значениях сопротивления в диапазоне 0,15–0,5 Ом байпасный



Рис. 6. Вольт-амперные характеристики модуля при разном значении добавочного сопротивления в цепи ячеек **Fig. 6.** I-V characteristics of the module at different values of the additional resistance in the cell circuit

2025:29(1):82-95

iPolytech Journal

диод не открывается, что указывает на недостаточное значение сопротивления для его срабатывания.

Анализ ВАХ, полученной для данного варианта, позволяет сделать вывод о наличии неисправности в модуле, поскольку наблюдается снижение значений точек максимальной мощности (MPP, от англ. Maximum Power Point). Мощность контрольного образца составляет 84,6 Вт и линейно уменьшается с увеличением сопротивления.

Был смоделирован вариант, когда при значении добавочного сопротивления 20 Ом байпасный диод по естественным причинам перестал открываться. Данный факт визуально выявляется по характеру кривой ВАХ и показателю уменьшения мощности, которая снизилась с 84,6 до 10,7 Вт по сравнению с контрольным образцом.

Экспериментальным методом, подбирая разные значения сопротивлений, был определен интервал значений, при котором наблюдается начало проводимости шунтирующего диода (рис. 7).

Угол наклона характеристик/ступень при значениях сопротивлений 0,71, 1,06 и 1,42 Ом свидетельствует об открытии байпасного диода. Интервал значений сопротивления от 0,71 до 1,06 Ом соответствует области перехода диода в проводящее состояние. Более точное определение значения сопротивления, при котором диод переходит в проводящее состояние, может быть получено посредством расчетного метода с использованием параметров вольт-амперной характеристики шунтирующего диода.

Рост сопротивления между ячейками/ элементами ФЭМ является серьезной проблемой, которая приводит к снижению производительности модуля, перегреву, появлению различных дефектов.

К наиболее распространенным проблемам относятся следующие: отслоение герметика, проявляющееся в виде белых пятен на поверхности; окисление контактов, особенно при повышенной влажности; разрушение контактов, вызванное некачественной пайкой, вибрацией и механическими повреждениями.





Fig. 7. Experimental measuring of series additional resistance values in the cell circuit to identify the moment of shunt diode opening

20

6

5

Кирпичникова И.М., Заварухин В.А., Серов В.А. Обнаружение потенциальных неисправностей фотоэлектрических... Kirpichnikova I.M., Zavarukhin V.A., Serov V.A. I-V curves for detecting faults of operating photovoltaic modules...

Внедрение своевременных мер по обнаружению и предупреждению подобных неисправностей способствует увеличению срока эксплуатации ФЭМ и поддержанию их рабочих характеристик на заданном уровне.

Добавочное сопротивление в цепи между модулями. Для моделирования повреждения на участке электрической цепи (рис. 8) между модулями было использовано добавочное сопротивление. Данный подход позволяет имитировать такие дефекты, как окисление или некачественное соединение контактов. Включение ФЭМ в цепочку (стринг) приводит к тому, что увеличение сопротивления на участке между двумя модулями повлияет на ВАХ всей цепи.

Данный эксперимент основан на том же принципе, что и первый. Однако имеется существенное отличие: в первом эксперименте было установлено, что при возникновении неисправности сопротивление может увели-



Рис. 8. Принципиальная схема с добавочным сопротивлением в цепи между модулями

Fig. 8. Schematic diagram with additional resistance in the circuit between the modules

чиваться только до значения 0,71 Ом, после чего участок цепи начинает шунтироваться диодом. В настоящем же случае сопротивление может расти в широком диапазоне значений, и шунтирующий диод не переходит в проводящее состояние (рис. 9).



Рис. 9. Вольт-амперные характеристики фотоэлектрического модуля при разном значении добавочного сопротивления в цепи между модулями

Fig. 9. I-V characteristics of the photovoltaic module (PVM) at different values of additional resistance in the circuit between modules

https://ipolytech.elpub.ru ·

Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 82-95 2025:29(1):82-95

Сравнение точек МРР на ВАХ при добавочном сопротивлении 0,35 Ом в двух экспериментах показало существенную разницу: в первом опыте максимальная мощность составляла 72,9 Вт, а во втором – 53,8 Вт. Данный факт свидетельствует о том, что разница расположения последовательного сопротивления оказывает влияние на реакцию ВАХ модулей.

Периодический анализ кривой ВАХ по росту такого сопротивления позволяет выявить причины его появления. Даже незначительные значения сопротивления могут указывать на место локализации дефекта.

Имитация работы байпасного диода. В рамках данного эксперимента моделировалась работа шунтирующего диода при различных уровнях затенения без использования добавочного сопротивления. Затенение ячейки происходило перекрытием потока солнечного света листом бумаги для одной ячейки (рис. 10 *a*) и четырех (рис. 10 *b*).

В случае, если ячейка затеняется какими-либо внешними факторами, она перестанет вырабатывать электрическую энергию и будет вести себя как полупроводящее сопротивление, сильно уменьшая общее количество энергии, производимой последовательной цепью солнечного модуля. При этом мощность, генерируемая незатененными ячейками, рассеивается затененной ячейкой, вызывая перегрев и появление горячих точек (hot spot/point) модуля [13–15].

Байпасные диоды могут перестать функционировать вследствие перенапряжения, к примеру, в период грозовых явлений либо



ISSN 2782-6341 (online)

ISSN 2782-4004 (print)

Рис. 10. Имитация затенения ячеек фотоэлектрического модуля BSP 32-100: а – затенение одной ячейки; b – затенение четырех ячеек

Fig. 10. Simulation of BSP 32-100 photovoltaic module cells shading: a – one cell shading; b – four cells shading

перегрева. Стоит отметить два характерных вида его неисправности: обрыв или короткое замыкание (КЗ). При нормальной работе ФЭМ без затенения обрыв шунтирующего диода (рис. 11 *b*) себя никак не проявляет и влияния на работу модуля не оказывает. На рис. 11 *a* показан вариант, когда диод в режиме КЗ приводит к снижению генерируемой энергии определенной части ФЭМ и ускоряет процесс их деградации.

Принципиальные схемы (рис. 11 *a*, *b*) являются аварийными режимами работы модулей. В первом случае шунтирующий диод находится в режиме КЗ и выводит из работы часть модуля, а во втором случае диод нахо-





Fig. 11. Schematic diagram of emergency operation of the photovoltaic module: a – diode in short circuit mode; b – diode in open circuit mode

Кирпичникова И.М., Заварухин В.А., Серов В.А. Обнаружение потенциальных неисправностей фотоэлектрических... Kirpichnikova I.M., Zavarukhin V.A., Serov V.A. I-V curves for detecting faults of operating photovoltaic modules...

дится в состоянии обрыва цепи и не защищает модуль от частичного затенения.

Используя метод сравнительного анализа, становится понятно, какого рода неисправность присутствует в режиме работы модуля, оперируя данными ВАХ и значениями точек максимальной мощности (рис. 12), и как можно локализовать выявленный эффект.

У исследуемого ФЭМ все ячейки одинаковые, соединены последовательно и разделены на две равные секции. При наличии на каждой секции проводящего шунтирующего диода $U_{xx \ C}$ шд напряжение холостого хода модуля с таким диодом будет ниже напряжения холостого хода $U_{xx \ KM}$ исправного ФЭМ на величину напряжения ΔU шунтированной группы ячеек, которое равно:

$$\Delta U = \frac{U_{\rm xx \, KM}}{n} \times N \times Z, \qquad (1)$$

где $U_{\rm xx \ KM}$ – напряжение холостого хода контрольной ВАХ исследуемого модуля, В; n – количество ячеек в модуле, шт.; N – количество ячеек в группе на шунтирующий диод, шт.; Z – число групп, шунтируемых диодом.

На кривой ВАХ (см. рис. 12) заметно смещение по оси напряжения на величину ΔU : от $U_{\rm XX \ KM}$ до $U_{\rm XX \ C \ ШД}$.

Влияние наличия шунтирующего сопротивления в цепи фотоэлектрического модуля. В полностью исправных модулях с качественными ячейками значение шунтирующего сопротивления очень велико. Из-за производственных дефектов (неоднородность материалов ячеек) или некачественного сырья (наличие примесей), используемого для создания солнечных элементов, могут возникать нежелательные пути для протекания токов, что снижает полезную генерацию всей цепи ФЭМ [16].

Подключение добавочного сопротивления (рис. 13) имитирует результирующее шунтирующее сопротивление для всех ячеек одного модуля [17].

Угол наклона при шунтирующем сопротивлении растет по мере уменьшения сопротивления, так как растут токи утечки (рис. 14). По углу наклона характеристики вблизи точки короткого замыкания проводится оценка значения сопротивления [2, 18].

Кроме токов утечек, протекающих в ячейках, могут возникать токи утечки через герметизирующие материалы модулей. Такое явление называется потенциально-ин-



Рис. 12. Вольт-амперные характеристики фотоэлектрического модуля при разном уровне затенения ячеек **Fig. 12.** I-V characteristics of a photovoltaic module at different levels of cell shading

ISSN 2782-6341 (online)



Polytech Journal



Рис. 13. Принципиальная схема включения шунтирующего сопротивления в цепь модуля

Fig. 13. Schematic diagram of including bypass resistance in the module circuit

дуцированной деградацией (PID, от англ. Potential-Induced Degradation) и возникает при сборках модулей в последовательные цепи с напряжением от ~600 В и выше. Это явление связано с некачественными герметизирующими материалами и зачастую является обратимым типом деградации [19, 20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данный момент диагностика ФЭМ в большей степени проводится вручную. Визуальный осмотр и анализ вольт-амперных характеристик занимают большое количество времени. Сектор диагностики ФЭМ является несформированным, и многие компании предлагают свои варианты оценки состояния модулей. Проблемы ФЭМ, описанные в работе, имеют характерные отличия, которые можно наблюдать на графиках ВАХ. Используя только кривую ВАХ и значение энергетической освещенности в месте расположения ФЭМ, можно определить состояние модулей в цепи, а также причину снижения мощности при возникновении проблем. Таким образом, экономится время на проведение диагностики больших массивов ФЭМ солнечных электростанций.

Рассмотренный в статье способ обнаружения потенциальных неисправностей фотоэлектрических модулей в реальных условиях эксплуатации считается информативным для одиночных ФЭМ и может де-



Рис. 14. Вольт-амперные характеристики с наличием шунтирующего сопротивления в цепи фотоэлектрических модулей **Fig. 14.** I-V characteristics with the presence of bypass resistance in the photovoltaic module circuit

https://ipolytech.elpub.ru

монстрировать данные о неисправностях, которые визуально проблематично обнаружить.

Направлением дальнейших исследований является рассмотрение вопросов использования разработанного алгоритма анализа состояния фотоэлектрических модулей на солнечных электростанциях. Мы полагаем, что полученные закономерности будут характерны и для нескольких модулей, объединенных в одну цепь, поскольку такое соединение также представляет собой последовательно соединенные ячейки, т.е. ВАХ такой цепи будет отличаться от рассмотренных в статье ВАХ одиночного ФЭМ только масштабами.

Список источников

1. Кирпичникова И.М., Заварухин В.А., Слетова Е.Д. Выбор параметров вольтамперной характеристики для определения возможных причин деградации фотоэлектрических модулей // Энергобезопасность и энергосбережение. 2024. № 3. С. 15–21. EDN: SMFSKD.

2. Da Silva M.K., Gul M.S., Chaudhry H. Review on the sources of power loss in monofacial and bifacial photovoltaic technologies // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 23. P. 7935. https://doi.org/10.3390/en14237935.

3. Кирпичникова И.М., Заварухин В.А. Деградация солнечных модулей. Виды, причины, методы диагностики модулей // Энергосбережение и водоподготовка. 2021. № 2. С. 37–42. EDN: PETZHY.

4. Smith J. Solar panel efficiency over time. Режим доступа: https://www.solarreviews.com/blog/how-has-the-price-and-efficiency-of-solar-panels-changed-over-time (дата обращения: 30.09.2024).

5. Jordan D.C., Kurtz S.R. Photovoltaic degradation rates – an analytical review // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2013. Vol. 21. Iss. 1. P. 12–29. https://doi.org/10.1002/pip.1182.

6. Gyamfi S., Aboagye B., Peprah F., Obeng M. Degradation analysis of polycrystalline silicon modules from different manufacturers under the same climatic conditions // Energy Conversion and Management: X. 2023. Vol. 20. P. 100403. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100403.

7. Pandey S., Kumar S., Mhatre R., Singh T. Analysis of performance degradation of PV modules. Режим доступа: https://www.powermag.com/analysis-of-performance-degradation-of-pv-modules/ (дата обращения: 30.09.2024).

8. Libra M., Mrázek D., Tyukhov I., Severová L., Poulek V., Mach J., et al. Reduced real lifetime of PV panels – economic consequences // Solar Energy. 2023. Vol. 259. P. 229–234. https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.063.

9. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б., Шестакова В.В. Снижение генерации электрической энергии солнечными модулями в условиях запыленности местности // iPolytech Journal. 2023. Vol. 27. No. 1. P. 83–93. https://doi.org/ 10.21285/1814-3520-2023-1-83-93. EDN: URBKSQ.

10. Satterlee C. IV Swinger 2. Step-by-step construction: arduino Shield PCB Designs. Режим доступа: https://cdn. instructables.com/ORIG/F2T/I6P6/JS00S2H3/F2TI6P6JS00S2H3.pdf (дата обращения: 30.09.2024).

11. Ma Mingyao, Zhang Zhixiang, Xie Zhen, Yun Ping, Zhang Xing, Li Fei. Fault diagnosis of cracks in crystalline silicon photovoltaic modules through I-V curve // Microelectronics Reliability. 2020. Vol. 114. Iss. 6 P. 113848. https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113848.

12. Dhimish M., Holmes V., Mehrdadi B., Dales M. The impact of cracks on photovoltaic power performance // Journal of Science: Advanced Materials and Devices. 2017. Vol. 2. Iss. 2. P. 199–209. https://doi.org/10.1016/ j.jsamd.2017.05.005.

13. ШвецС.В., Байшев А.В. Назначение шунтирующих диодов солнечной панели и методы их диагностики // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 6. С. 1187–1202. https://doi.org/ 10.21285/1814-3520-2019-6-1187-1202. EDN: RZXZEQ.

14. Deng Shifeng, Zhang Zhen, Ju Chenhui, Dong Jingbing, Xia Zhengyue, Yan Xinchun, et al. Research on hot spot risk for high-efficiency solar module // Energy Procedia. 2017. Vol. 130. P. 77–86. https://doi.org/10.1016 /j.egypro.2017.09.399.

15. Wang Ao, Xuan Yimin. Close examination of localized hot spots within photovoltaic modules // Energy Conversion and Management. 2021. Vol. 234. P. 113959. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113959.

16. Naumann V., Lausch D., Hähnel A., Breitenstein O., Hagendorf C. Nanoscopic studies of 2D-extended defects in silicon that cause shunting of Si-solar cells // Current topics in solid state physics. 2015. Vol. 20. Iss. 8. P. 1103–1107. https://doi.org/10.1002/pssc.201400225.

17. Gaevskaya A. Approximation algorithm for current-voltage characteristics of PV modules under shading conditions // Vidnovluvana energetika. 2019. Iss. 3. P. 21–29. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3(58).21-29.

18. Honsberg C., Bowden S. Shunt resistance. Режим доступа: https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-celloperation/shunt-resistance (дата обращения: 30.09.2024).

19. Swanson R., Cudzinovic M., DeCeuster D., Desai V., Jürgens J., Kaminaret N., et al. The surface polarization effect in high-efficiency silicon solar cells // Proceedings of the 15th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (Shanghai, 11–13 October 2005). Shanghai, 2005. P. 410–413.

20. Luo Wei, Khoo Yong Sheng, Hacke Peter, Naumann Volker, Lausch Dominik, Harvey S.P., et al. Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review // Energy & Environmental Science. 2017. Vol. 10. Iss. 1. P. 43–68. https://doi.org/10.1039/C6EE02271E.

iPolytech Journal

2025;29(1):82-95

ISSN 2782-6341 (online)

References

1. Kirpichnikova I.M., Zavarukhin V.A., Sletova E.D. Selection of V-I characteristics for finding solar module degradation causes. *Energy Safety and Energy Economy.* 2024;3:15-21. (In Russ.). EDN: SMFSKD.

2. Da Silva M.K., Gul M.S., Chaudhry H. Review on the sources of power loss in monofacial and bifacial photovoltaic technologies. *Energies*. 2021;14(23):7935. https://doi.org/10.3390/en14237935.

3. Kirpichnikova I.M., Zavarukhin V.A. Degradation of photovoltaic modules. Types, causes, diagnostic methods of modules. *Energosberezhenie i vodopodgotovka*. 2021;2:37-42. (In Russ.). EDN: PETZHY.

4. Smith J. Solar panel efficiency over time. Available from: https://blueravensolar.com/blog/a-brief-history-and-in depth-look-into-solar-panel-efficiency/ [Accessed 30th September 2024].

5. Jordan D.C., Kurtz S.R. Photovoltaic degradation rates – an analytical review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2013;21(1):12-29. https://doi.org/10.1002/pip.1182.

6. Gyamfi S., Aboagye B., Peprah F., Obeng M. Degradation analysis of polycrystalline silicon modules from different manufacturers under the same climatic conditions. *Energy Conversion and Management: X.* 2023;20:100403. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100403.

7. Pandey S., Kumar S., Mhatre R., Singh T. Analysis of performance degradation of PV modules. Available from: https://www.powermag.com/analysis-of-performance-degradation-of-pv-modules/ [Accessed 30th September 2024].

8. Libra M., Mrázek D., Tyukhov I., Severová L., Poulek V., Mach J. et al. Reduced real lifetime of PV panels – economic consequences. *Solar Energy*. 2023;259:229-234. https://doi.org/10.1016/j.solener. 2023.04.063.

9. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B., Shestakova V.V. Reduced power generation efficiency of solar panels in dusty locations. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):83-93. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-83-93. EDN: URBKSQ.

10. Satterlee C. IV Swinger 2. Step-by-step construction: Arduino shield PCB designs. Available from: https://cdn. instructables.com/ORIG/F2T/I6P6/JS00S2H3/F2TI6P6JS00S2H3.pdf [Accessed 30th September 2024].

11. Ma Mingyao, Zhang Zhixiang, Xie Zhen, Yun Ping, Zhang Xing, Li Fei. Fault diagnosis of cracks in crystalline silicon photovoltaic modules through I-V curve. *Microelectronics Reliability*. 2020;114(6):113848. https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113848.

12. Dhimish M., Holmes V., Mehrdadi B., Dales M. The impact of cracks on photovoltaic power performance. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2017;2(2):199-209. https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2017.05.005.

13. Shvets S.V., Baishev A.V. Bypass diode function in solar panels and their diagnostic methods. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(6):1187-1202. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1187-1202. EDN: RZXZEQ.

14. Deng Shifeng, Zhang Zhen, Ju Chenhui, Dong Jingbing, Xia Zhengyue, Yan Xinchun, et al. Research on hot spot risk for high-efficiency solar module. *Energy Procedia*. 2017;130:77-86. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.399. 15. Wang Ao, Xuan Yimin. Close examination of localized hot spots within photovoltaic modules. *Energy Conversion and Management*. 2021;234:113959. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113959.

16. Naumann V., Lausch D., Hähnel A., Breitenstein O., Hagendorf C. Nanoscopic studies of 2D-extended defects in silicon that cause shunting of Si-solar cells. *Current topics in solid state physics*. 2015;20(8):1103-1107. https://doi.org/10.1002/pssc.201400225.

17. Gaevskaya A. Approximation algorithm for current-voltage characteristics of PV modules under shading conditions. *Vidnovluvana energetika*. 2019;3:21-29. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3(58).21-29.

18. Honsberg C., Bowden S. Shunt resistance. Available from: https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/shunt-resistance [Accessed 30th September 2024].

19. Swanson R., Cudzinovic M., DeCeuster D., Desai V., Jürgens J., Kaminaret N., et al. The surface polarization effect in high-efficiency silicon solar cells. In: *Proceedings of the 15th International Photovoltaic Science & Engineering Conference*. 11–13 October 2005, Shanghai. Shanghai; 2005, p. 410-413.

20. Luo Wei, Khoo Yong Sheng, Hacke Peter, Naumann Volker, Lausch Dominik, Harvey S.P., et al. Potentialinduced degradation in photovoltaic modules: a critical review. *Energy & Environmental Science*. 2017;10(1):43-68. https://doi.org/10.1039/C6EE02271E.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кирпичникова Ирина Михайловна,

д.т.н., профессор,

профессор кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Россия kirpichnikovaim@susu.ru http://orcid.org/0000-0002-4078-8790

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina M. Kirpichnikova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, 76, Lenin pr., Chelyabinsk 454080, Russia ⊠ kirpichnikovaim@susu.ru http://orcid.org/0000-0002-4078-8790

https://ipolytech.elpub.ru

Кирпичникова И.М., Заварухин В.А., Серов В.А. Обнаружение потенциальных неисправностей фотоэлектрических... Kirpichnikova I.M., Zavarukhin V.A., Serov V.A. I-V curves for detecting faults of operating photovoltaic modules...

Заварухин Владимир Александрович,

аспирант, Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Россия zavaruhin-425@yandex.ru

Серов Виктор Алексеевич,

аспирант, Южно-Уральский государственный университет, 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Россия va_serov99@mail.ru https://orcid.org/0009-0003-6415-2935

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.11.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.12.2024 г.; принята к публикации 30.01.2025 г.

Vladimir A. Zavarukhin,

Postgraduate Student, South Ural State University, 76, Lenin pr., Chelyabinsk 454080, Russia zavaruhin-425@yandex.ru https://orcid.org/0009-0001-0810-1717

Viktor A. Serov,

Postgraduate Student, South Ural State University, 76, Lenin pr., Chelyabinsk 454080, Russia va_serov99@mail.ru https://orcid.org/0009-0003-6415-2935

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 18.11.2024; approved after reviewing 25.12.2024; accepted for publication 30.01.2025.

Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 96-106 2025:29(1):96-106

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья УДК 621.311 EDN: YOYFSO DOI: 10.21285/1814-3520-2025-1-96-106



Учёт гармонических искажений при моделировании электромагнитных полей в искусственных сооружениях железных дорог

А.В. Крюков^{1⊠}, Д.А. Середкин², Е.В. Воронина³

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия ¹⁻³Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

Резюме. Цель исследований – разработка моделей для определения электромагнитных полей в искусственных сооружениях железных дорог с учетом генерации высших гармоник электровозами. В качестве объекта исследований рассматривались поля в следующих сооружениях: туннель, галерея, а также мосты с ездой понизу и поверху. Для сравнения выполнены расчеты полей участка с плоским рельефом земной поверхности. При разработке цифровых моделей использован подход, базирующийся на представлении электроэнергетических систем в фазных координатах, реализованный в программном комплексе Fazonord, версия 5.3.7.0-2024. Для сооружений применялись наборы проводников, заземленных с двух сторон. Электромагнитные поля определялись на основе моделирования движения пяти поездов массой 3192 т в нечетном направлении с интервалом 22 мин. Установлено, что максимальные действующие значения напряженности электрического поля на рассматриваемом участке для некоторых сооружений превышали допустимую величину 5 кВ/м: на мосту с ездой поверху этот параметр достигал 9,8 кВ/м, а для тоннеля – 5,9 кВ/м. Показано, что ввиду больших межпоездных интервалов напряженность магнитного поля не выходила за нормативный предел (80 А/м). В результате проведенных исследований выявлено, что высшие гармоники, создаваемые электровозами, приводили к заметным искажениям годографов магнитного поля. А наличие искусственных сооружений вызывало существенные вариации характера распределения полей в сечении тяговой сети. Таким образом, разработаны цифровые модели систем тягового электроснабжения. Они позволяют адекватно определять динамику изменения напряженностей электромагнитного поля в пространстве, окружающем тяговую сеть 25 кВ, смонтированную внутри искусственных сооружений, которые содержат значительное число металлических деталей. Разработанная авторами компьютерная технология может эффективно использоваться на практике при разработке мероприятий по обеспечению электромагнитной безопасности в искусственных сооружениях электрифицированного железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: электромагнитные поля, искусственные сооружения, моделирование

Финансирование. Исследования выполнены в соответствии с программой гранта на проведение фундаментальных и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами № 25-29-00937 «Разработка методов, алгоритмов и средств математического моделирования режимов интеллектуальных электроэнергетических систем с активно-адаптивной сетью на основе фазных координат для повышения качества электрической энергии и электромагнитной безопасности».

Для цитирования: Крюков А.В., Середкин Д.А., Воронина Е.В. Учёт гармонических искажений при моделировании электромагнитных полей в искусственных сооружениях железных дорог// iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 1. С. 96–106. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-96-106. EDN: YOYFSO.

POWER ENGINEERING

Original article

Consideration of harmonic distortions in electromagnetic simulation of artificial railroad structures

Andrey V. Kryukov¹, Dmitry A. Seredkin², Ekaterina V. Voronina³

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia ¹⁻³Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Abstract. This study aims to develop models for defining harmonic distortions in electromagnetic modeling of artificial railroad structures, taking into account high harmonic generation of electric locomotives. The research objects included tun-

Крюков А.В., Середкин Д.А., Воронина Е.В. Учёт гармонических искажений при моделировании электромагнитных полей... Kryukov A.V., Seredkin D.A., Voronina E.V. Consideration of harmonic distortions in electromagnetic simulation of artificial...

nels and galleries, as well as through-type and deck-type truss bridges. Calculations of sites having a flat relief were carried out for comparison. When developing digital models, an approach representing power supply systems in phase coordinates in the Fazonord software package (5.3.7.0-2024 version) was used. Sets of conductors grounded on both sides were used for constructions. Electromagnetic fields were defined by simulation of five down trains weighing 3192 tons and moving at intervals of 22 minutes. For several constructions, the maximum working values of electric field intensity at the studied sites exceeded the permissible value of 5 kV/m, i.e., 9.8 kV/m for the deck-type truss bridge and 5.9 kV/m for that of the tunnel type. Due to extended train intervals, magnetic field intensity had never exceeded the specified limit of 80 A/m. Our study revealed that high harmonics of electric locomotives provoke severe distortions in the hodographs of magnetic fields, while artificial structures significantly change field distribution in the section of the electric traction network. Thus, digital models of traction-energy systems were developed. These models make it possible to accurately define the dynamics of changes in electromagnetic field intensity in a space surrounding the electric traction network of 25 kV inside artificial structures consisting of many metal parts. The computer technology developed by the authors can be effectively used in the development of measures to ensure electromagnetic safety in artificial structures of electrified railway transport.

Keywords: electromagnetic fields, man-made structures, modeling

Funding. The research was carried out in accordance with the grant program for conducting fundamental and exploratory scientific research by small individual research groups No. 25-29-00937 "Development of methods, algorithms and means of mathematical modeling of modes of intelligent electric power systems with an active-adaptive network based on phase coordinates to improve the quality of electrical energy and electromagnetic safety."

For citation: Kryukov A.V., Seredkin D.A., Voronina E.V. Consideration of harmonic distortions in electromagnetic simulation of artificial railroad structures. *iPolytech Journal.* 2025;29(1):96-106. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-96-106. EDN: YOYFSO.

введение

Вопросы моделирования условий электромагнитной безопасности (ЭМБ) вблизи объектов железнодорожного транспорта приобретают в современных условиях особую актуальность [1, 2]. Ключевые аспекты ее обеспечения состоят в определении электромагнитных полей и применении на этой основе мероприятий по снижению их уровней [3-5]. Важность проведения исследований, направленных на разработку методов и средств моделирования электромагнитных полей (ЭМП) подтверждается большим числом отечественных и зарубежных публикаций, посвященных данной тематике. Так, например, вопросы анализа электромагнитной обстановки в тяговой сети при коротких замыканиях (КЗ) рассмотрены в [6]. На основе теории многопроводных линий электропередачи и метода конечных элементов авторами предложена математическая модель тяговой сети (TC) для изучения распределения тока при падении контактного провода на рельс, что позволило произвести расчет магнитного поля. Анализ ЭМП в зонах расположения железнодорожного оборудования и установок сделан в [7]. Приведены результаты моделирования ЭМП вблизи контактных подвесок и вокруг заземляющего контура. Выполнена проверка конструкций электроустановок по критерию электромагнитной совместимости. Оценка электромагнитной обстановки на объектах железной дороги, электрифицированной на постоянном токе, приведена в [8]. Представлены методики прибли-

четы дают удовлетворительное совпадение с экспериментом, что позволяет рекомендовать их для анализа электромагнитной обстановки.
Результаты исследования ЭМП ТС в режимах КЗ приведены в [9]. Для моделирования ТС авторы использовали модель многопроводной линии электропередачи (ЛЭП); при этом учитывалось неравномерное распределение токов в ТС, металлических деталей туннеля и другие сложные факторы. Для упрощения расчета матрицы параметров применялась регрессионная нейронная сеть.
В сочетании с методом конечных разностей во временной области прогнозировалось распределение токов и ЭМП, а точность проверялась полевыми испытаниями. Измерения магнитного поля частотой 50 Гц на итальянской

женного расчета суммарных напряженностей

ЭМП в воздушной среде. Даны аналитические

зависимости, позволяющие оценить основ-

ные источники ЭМП, существенно влияющие

на характеристики среды. Показано, что рас-

распределение токов и ЭМП, а точность проверялась полевыми испытаниями. Измерения магнитного поля частотой 50 Гц на итальянской высокоскоростной железнодорожной системе представлены в [10]. Результаты замеров сравнивались с данными, полученными с помощью имитационной модели. Анализ ЭМП, создаваемого электрифицированным участком железной дороги, выполнен в [11]. Представлен метод расчета собственных и взаимных сопротивлений ТС, используемой в Румынии. Дана оценка влияния ЭМП ТС на металлические объекты, находящиеся вблизи дороги. Полученные результаты подтверждены испытаниями. Анализ электромагнитной среды в современной же-

ISSN 2782-6341 (online)

Polytech Journal 2025; 1:23: Nº 1:0 2025;29(1):96-106

лезнодорожной системе, основанный на измерениях, проведенных авторами для монорельса Мумбаи, выполнен в [12].

Цель исследования состояла в определении напряженностей ЭМП и оценке электромагнитной совместимости для системы управления поездом. Удельная энергия электромагнитного поля частотой 50 Гцрассчитана в [13]. Представлена модель взаимодействия человека с магнитными полями, создаваемыми ЛЭП. Проанализированы плотности электрического тока, индуцированные магнитные поля (МП) частотой 50 Гц в модели человека, размещенной в непосредственной близости от ЛЭП. Удельная скорость поглощения исследовалась для различных точек под линией. Также описан случай обслуживания ЛЭП под напряжением, когда персонал может находиться вблизи фазных проводников. Вопросы влияния ЭМП вокруг ТС на магнитометры рассмотрены в [14]. Показано, что ток силой 300 А, протекающий через контактную подвеску (КП), которая питает высокоскоростной поезд, генерирует сильное магнитное поле. Проведено измерение ЭМП вокруг КП и проанализировано его влияние на магнитометры. Для поезда, движущегося со скоростью 300 км/ч, МП было измерено на расстоянии 3 м от КП. Экспериментально подтверждена погрешность магнитометра, вызванная КП, и доказано, что для ее уменьшения можно использовать фильтр. Задача вычисления

электромагнитного влияния ТС переменного тока на железнодорожные линии связи (ЛС) решена в [15]. Приведены зависимости напряжения от ширины сближения ЛС и ТС. Проведены экспериментальные измерения гармоник в тяговом токе и выполнен анализ их влияния на ЛС. Результаты исследования ЭМП, создаваемого высоковольтными линиями, с использованием Comsol Multiphysics приведены в [16]. На этой основе выполнены расчеты ЭМП, создаваемых ЛЭП. Полученные уровни напряженностей поля сравнивались с рекомендациями Международной комиссии по защите от неионизирующих излучений.

Ha основе анализа представленных выше публикаций можно сделать вывод о том, что в них даны решения важных задач по определению электромагнитных полей, создаваемых ТС. Однако методы, позволяющие корректно учитывать металлические конструкции искусственных сооружений (ИС), таких как тоннели, мосты, галереи, существенно искажающие распределение напряженностей ЭМП в пространстве, в описанных выше работах не рассмотрены. Для решения этой задачи можно использовать подход, базирующийся на применении мультифазного представления ЭЭС в фазных координатах [17], реализованный в программном комплексе Fazonord [18-20]. Его отличительные особенности представлены на диаграмме рис. 1.



Рис. 1. Особенности рассматриваемой методики **Fig. 1.** Features of the considered methodology

Крюков А.В., Середкин Д.А., Воронина Е.В. Учёт гармонических искажений при моделировании электромагнитных полей... Kryukov A.V., Seredkin D.A., Voronina E.V. Consideration of harmonic distortions in electromagnetic simulation of artificial...

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Линии электропередачи и электрифицированные железные дороги оказывают основное влияние на объекты в «ближней зоне», что позволяет использовать квазистационарный подход и рассматривать раздельно электрическую и магнитную составляющие поля.

Анализу ЭМП электрифицированных железных дорог переменного тока посвящен ряд работ авторов, в частности [19–21]. В данной статье приведены новые модели, позволяющие рассчитывать напряженности ЭМП в ИС с учетом высших гармоник, генерируемых выпрямительными электровозами переменного тока. Для решения задач определения ЭМП в пространстве, окружающем TC, расположенных в искусственных сооружениях, использовался промышленный программный комплекс (ПК) Fazonord, версия 5.3.7.0-2024.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассматривалась система тягового электроснабжения (СТЭ) однопутной ТС с консольным питанием, включающая два участка. На первом была представлена ТС традиционной конструкции, а при моделировании второго использовались следующие варианты искусственных сооружений: туннель, галерея, а также мосты с ездой понизу и поверху, рис. 2.



Рис. 2. Сооружения железнодорожного транспорта: а – мост с ездой понизу; b – мост с ездой поверху; с – туннель; d – галерея **Fig. 2.** Railway transport structures: a – lower-deck bridge; b – deck bridge; c – tunnel; d – gallery

Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 96-106 2025:29(1):96-106

ISSN 2782-6341 (online)

Для сравнения были проведены расчеты ЭМП ТС с плоским рельефом земной поверхности. Предполагалось, что ТС выполнена проводами ПБСМ-95, МФ-100 и рельсами Р65. В соответствии с методикой, описанной в [10], при моделировании ИС использовались наборы проводников, заземленных с двух сторон, рис. 3.

Высоты поверхностей мостов задавались равными 10 м. Напряженности ЭМП определялись на основе моделирования движения пяти поездов массой 3192 т в нечетном направлении с интервалом 22 мин, рис. 4.

Напряженности ЭМП вычислялись с учетом ВГ до 39 гармоники включительно, рис. 5.

Результаты расчета ЭМП приведены на рис. 6-9 для диапазона времени 82...94 мин,

отвечающего полному заполнению участка поездами. Использовалась правосторонняя система координат со следующим расположением осей: ось *z* в сечении TC была направлена на наблюдателя, ось *y* – вертикально вверх, ось *x* – перпендикулярно трассе железной дороги.

Точки фиксации ЭМП в сечении TC выбирались на высоте 1,8 м от основания ИС. Максимальные значения напряженностей полей в ИС и для случая, отвечающего плоскому рельефу, сведены в таблицу. Анализ полученных результатов позволяет разделить рассмотренные варианты выполнения TC на две группы. Первую образуют ИС, в которых тяговая сеть полностью или частично окружена заземленными проводниками.



Рис. 3. Координаты токоведущих частей и проводников, имитирующих ИС: а – галерея; b – туннель; с – мост с ездой поверху; d – мост с ездой понизу

Fig. 3. Coordinates of live parts and conductors simulating man-made structures: a – gallery; b – tunnel; c – deck bridge bridge; d – lower deck bridge

Крюков А.В., Середкин Д.А., Воронина Е.В. Учёт гармонических искажений при моделировании электромагнитных полей... Kryukov A.V., Seredkin D.A., Voronina E.V. Consideration of harmonic distortions in electromagnetic simulation of artificial...



Рис. 4. График движения (а) и токовый профиль (b) **Fig. 4.** Motion graph (a) and current profile (b)



Fig. 5. Harmonics of electric locomotive current: $I_k^* = \frac{100I_k}{I_1}, \%$

Ко второй относятся TC, проложенные на плоском рельефе, и мост с ездой поверху. Для первой группы наблюдается снижение максимумов напряженностей ЭП по сравнению с отсутствием ИС на 55% для галереи, 34% для тоннеля, 56% для моста с ездой понизу. Для моста с ездой поверху имеет место повышение данного показателя на 10%. Аналогичные вычисления, выполненные применительно к МП, дают следующие результаты: галерея – 42% понижения; туннель – 11%, мост с ездой понизу – 59%. Для моста второго типа наблюдается уменьшение данного параметра на 16%. Полученные результаты подтверждают



актуальность учета ИС при анализе условий электромагнитной безопасности. Следует отметить, что нормативный предел на высоте 1,8 м, равный 5 кВ/м по действующему значению, нарушается для трех вариантов ТС: проложенной по плоскому рельефу (8,9 кВ/м), мосту с ездой поверху (9,8 кВ/м) и проходящей внутри туннеля (5,9 кВ/м). Ввиду больших межпоездных интервалов напряженность МП не выходила за нормативный предел 80 А/м. Однако при работе на контактной сети с изолирующих площадок без снятия напряжения возможно превышение допустимых уровней электрического и магнитного полей.

Максимальные значения амплитуд напряженностей электромагнитных полей Maximum values of electromagnetic field strength voltage amplitudes

Парамотр	Плоркод ролла	Fatopog	Тулисан	Мост с	ездой
параметр	плоская земля	Талерея	Туннель	поверху	понизу
max(<i>E</i> _{max}), кВ/м	12,6	5,7	8,3	13,9	5,5
max(H _{max}), А/м	20,1	11,6	11,1	16,9	8,2

https://ipolytech.elpub.ru

Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 96-106 2025;29(1):96-106

ISSN 2782-6341 (online)

Максимальные значения напряженностей ЭМП отвечают точке наблюдения, расположенной на оси пути, рис. 6. Отличия $\max(E_{\max}), \max(H_{\max})$ по отношению к плоской земле проиллюстрированы на рис. 7.

Временные зависимости амплитуд напряженностей ЭМП в точке *x* = 0, расположенной на оси пути, представлены на рис. 8.



Рис. 6. Распределение максимальных значений амплитуд напряженностей электромагнитных полей в сечении тяговой сети: 1 – плоская земля; 2 – галерея; 3 – туннель; 4 – мост с ездой поверху; 5 – мост с ездой понизу **Fig. 6.** Distribution of maximum values of electromagnetic field strength amplitudes in the traction network section: 1 – flat ground; 2 – gallery; 3 – tunnel; 4 – deck bridge ; 5 – lower deck bridge



Рис. 7. Отличия $\max(E_{\max}), \max(H_{\max})$ по отношению к плоской земле Fig. 7. Differences of $\max(E_{\max}), \max(H_{\max})$ in relation to the flat ground



Рис. 8. Графики $E_{\text{max}} = E_{\text{max}}(t)$, $H_{\text{max}} = H_{\text{max}}(t)$: цифровые обозначения аналогичны рис. 6 **Fig. 8.** Graphs of $E_{\text{max}} = E_{\text{max}}(t)$, $H_{\text{max}} = H_{\text{max}}(t)$: numerical symbols are similar to Fig. 6

https://ipolytech.elpub.ru

Крюков А.В., Середкин Д.А., Воронина Е.В. Учёт гармонических искажений при моделировании электромагнитных полей... Kryukov A.V., Seredkin D.A., Voronina E.V. Consideration of harmonic distortions in electromagnetic simulation of artificial...



Рис. 9. Годографы $E_y = E_y(E_x)$ (а) и $H_y = H_y(H_x)$ (b) в точке x = 2 м на 68 мин: цифровые обозначения аналогичны рис. 6 **Fig. 9.** Hodographs of $E_y = E_y(E_x)$ (a) and $H_y = H_y(H_x)$ (b) at point x = 2 m at 68 min: numerical designations are similar to Fig. 6

На рис. 9 приведено сравнение годографов напряженностей ЭМП для точки, отвечающей x = 2 м. Эта координата отвечает наиболее вероятному расположению персонала, обслуживающему электрифицированные железные дороги.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

 максимальные действующие значения напряженности ЭП на рассматриваемом участке для некоторых ИС превышали допустимые значения 5 кВ/м: на мосту с ездой поверху этот параметр достигал 9,8 кВ/м, а для тоннеля – 5,9 кВ/м.

- ввиду больших межпоездных интервалов напряженность МП не выходила за нормативный предел 80 А/м.

- высшие гармоники, создаваемые электровозами, приводили к заметным искажениям годографов векторов напряженности МП. Наличие искусственных сооружений вызывало существенные вариации характера распределения ЭМП в пространстве.

 наличие искусственных сооружений приводит к развороту годографов векторов напряженностей ЭМП; кроме того, экранирующий эффект снижает их гармонические искажения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены методика и цифровые модели СТЭ, позволяющие рассчитывать напряженности электромагнитных полей в искусственных сооружениях железнодорожного транспорта, таких как тоннели; галереи, а также мосты с ездой понизу и поверху. Эти объекты содержат большое число заземленных металлических деталей, существенно влияющих на уровни ЭМП, характер их распределения в пространстве и формы годографов векторы напряженностей. Научная новизна представленных результатов определяется следующими положениями:

 для моделирования ИС используются наборы токоведущих частей, заземленных по краям;

тяговые нагрузки формируются на основе имитации движения составов по реальным профилям пути;

осуществляется моделирование смеси
 ЭМП, образованной составляющими основной частоты и высшими гармоникам до 39
 включительно.

Практическая значимость разработанных моделей состоит в возможности их использования для выбора наиболее эффективных мероприятий по улучшению условий электромагнитной безопасности в ИС железнодорожного транспорта. **iPolytech Journal**

2025;29(1):96-106

ISSN 2782-6341 (online)

Список источников

1. Закирова А.Р. Защита электротехнического персонала от вредного воздействия электромагнитного поля. Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2018. 171 с. EDN: YLMQKS.

2. Кузнецов К.Б., Закирова А.Р. Оценка электромагнитной обстановки и вероятности возникновения профессионально обусловленного заболевания // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2014. № 4. С. 82–90. EDN: TEWMNJ.

3. Буякова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление: монография. Ангарск: АнГТУ, 2018. 382 с. EDN: YUYSPB.

4. Закирова А.Р., Буканов Ж.М. Исследования электромагнитных полей на рабочих местах персонала, обслуживающего контактную сеть // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2016. № 2. С. 73–83. http://doi.org/10.20291/2079-0392-2016-2-73-83. EDN: WBWUBN.

5. Сидоров А.И., Закирова А.Р., Горожанкин А.Н. Исследование энергетической нагрузки ЭМП вблизи контактной сети // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2024. Т. 24. № 1. С. 80–87. http://doi.org/10.14529/power240109. EDN: LKWVHZ.

6. Zhang Lu, Zhu Yun, Chen Song, Zhang Dan. Simulation and analysis for electromagnetic environment of traction network // XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. 2021. http://doi.org/10.23919/URSIGASS51995.2021.9560338.

7. Oancea C.D., Calin F., Golea V. On the electromagnetic field in the surrounding area of railway equipment and installations // International Conference on Electromechanical and Energy Systems. 2019. http://doi.org/ 10.1109/ SIELMEN.2019.8905871.

8. Apollonskii S.M. Estimation of the electromagnetic environment on objects of the railway electrified on direct current // IEEE EUROCON. St. Petersburg: IEEE, 2009. P. 1549–1555. http://doi.org/10.1109/ EURCON.2009.5167847.

9. Lu Nan, Zhu Feng, Yang Chengpan, Yang Yang, Lu Hede, Wang Zixuan. The research on electromagnetic emission of traction network with short-circuit current pulse // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2021. Vol. 8. No. 2. P. 2029–2036. http://doi.org/10.1109/TTE.2021.3115578.

10. Lucca G., Moro M., Florio R., Lidonnici G. Measurements and calculations of 50Hz magnetic field produced by Italian high speed railway system // International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE. 2012. http://doi.org/10.1109/EMCEurope.2012.6396900.

11. Oancea C.D., Calin F., Golea V. Analysis of the influences of the electromagnetic field produced by an electrified railway section // 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering. 2020. http://doi.org/10.1109/EEAE49144.2020.9279005.

12. Dan D., Chakrabarti S. Electromagnetic environment in modern railway system // 13th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility. 2015. P. 116–121. http://doi.org/10.1109/ INCEMIC.2015.8055860.

13. Kuznetsov K., Zakirova A., Averyanov U. Specific energy of 50 Hz electromagnetic field // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2017. http://doi.org/10.1109/ ICIEAM.2017.8076222.

14. Kim Jae Hee, Yoon Hyuk-Jin, Kim Dae-Hyun, Cho Bong-Kwan. Effects of magnetic fields around contact lines on magnetometers // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 132397-132403. http://doi.org/10.1109/ ACCESS.2020.3009948.

15. Serdiuk T., Ansari H.T., Rodica B. Electromagnetic Influence of AC traction network on the railway communication lines // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity. 2022. P. 326–329. http://doi.org/10.1109/EMCSI39492.2022.9889435.

16. Rachedi B.A., Babouri A., Berrouk F. A study of electromagnetic field generated by high voltage lines using Comsol Multiphysics // International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb. 2014. http://doi.org/ 10.1109/CISTEM.2014.7076989.

17. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем: монография. Иркутск: ИрГУПС, 2005. 273 с. EDN: PTVITA.

18. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат: монография. М.: Директ-Медиа, 2023. 156 с. EDN: LIJPRI.

19. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Черепанов А.В., Крюков А.Е., Середкин Д.А., Фесак И.А. Моделирование трехфазных систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока: монография. Екатеринбург: УрГУПС, 2023. 172 с. EDN: NHDULR.

20. Буякова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В., Середкин Д.А. Учет гармонических искажений при моделировании электромагнитных полей, создаваемых линиями электропередачи, питающими тяговые подстанции железных дорог // Электричество. 2022. № 5. С. 28–38. http://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-5-28-38. EDN: RXGASM.

21. Крюков А.В., Черепанов А.В., Любченко И.А. Комплексное использование технологий Smart Grid в тяговых сетях железных дорог // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 5. С. 1041–1052. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1041-1052. EDN: RNYCDC.

References

1. Zakirova A.R. Electrotechnical personnel protection from damage effect of electromagnetic field. Ekaterinburg: Ural State University of Railway Transport; 2018, 171 p. (In Russ.). EDN: YLMQKS.

2. Kuznetsov K.B., Zakirova A.R. Assessment of electromagnetic environment and the likelihood of occupational diseases. *Bulletin of the Ural State Transport University*. 2014;4:82-90. (In Russ.). EDN: TEWMNJ.

3. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Electromagnetic safety in railway power supply systems: modeling and control.* Angarsk: Angarsk State Technical Academy; 2018, 382 p. (In Russ.). EDN: YUYSPB.

4. Zakirova A.R., Bukanov Zh.M. Research of electromagnetic fields at workplaces of service personnel of contact lines. *Bulletin of the Ural State Transport University*. 2016;2:73-83. (In Russ.). http://doi.org/10.20291/2079-0392-2016-2-73-83. EDN: WBWUBN.

5. Sidorov A.I., Zakirova A.R., Gorozhankin A.N. Investigation of the energy load of an electromagnetic field near the contact network. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2024;24(1):80-87. (In Russ.). http://doi.org/10.14529/power240109. EDN: LKWVHZ.

6. Zhang Lu, Zhu Yun, Chen Song, Zhang Dan. Simulation and analysis for electromagnetic environment of traction network. In: 34th General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. 2021. http://doi.org/10.23919/URSIGASS51995.2021.9560338.

7. Oancea C.D., Calin F., Golea V. On the electromagnetic field in the surrounding area of railway equipment and installations. In: *International Conference on Electromechanical and Energy Systems*. 2019. http://doi.org/ 10.1109/SIELMEN.2019.8905871.

8. Apollonskii S.M. Estimation of the electromagnetic environment on objects of the railway electrified on direct current. In: *IEEE EUROCON*. St. Petersburg: IEEE; 2009, p. 1549-1555. http://doi.org/10.1109/EURCON.2009.5167847.

9. Lu Nan, Zhu Feng, Yang Chengpan, Yang Yang, Lu Hede, Wang Zixuan. The research on electromagnetic emission of traction network with short-circuit current pulse. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2021;8(2):2029-2036. http://doi.org/10.1109/TTE.2021.3115578.

10. Lucca G., Moro M., Florio R., Lidonnici G. Measurements and calculations of 50Hz magnetic field produced by Italian high speed railway system. In: *International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*. 2012. http://doi.org/10.1109/EMCEurope.2012.6396900.

11. Oancea C.D., Calin F., Golea V. Analysis of the influences of the electromagnetic field produced by an electrified railway section. In: 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering. 2020. http://doi.org/10.1109/EEAE49144.2020.9279005.

12. Dan D., Chakrabarti S. Electromagnetic environment in modern railway system. In: 13th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility. 2015;116-121. http://doi.org/10.1109/INCEMIC.2015.8055860.

13. Kuznetsov K., Zakirova A., Averyanov U. Specific energy of 50 Hz electromagnetic field. In: International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2017. http://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076222.

14. Kim Jae Hee, Yoon Hyuk-Jin, Kim Dae-Hyun, Cho Bong-Kwan. Effects of magnetic fields around contact lines on magnetometers. *IEEE Access*. 2020;8:132397-132403. http://doi.org/10.1109/ACCESS. 2020.3009948.

15. Serdiuk T., Ansari H.T., Rodica B. Electromagnetic Influence of AC traction network on the railway communication lines. In: *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity*. 2022;326-329. http://doi.org/10.1109/EMCSI39492.2022.9889435.

16. Rachedi B.A., Babouri A., Berrouk F. A study of electromagnetic field generated by high voltage lines using COMSOL MULTIPHYSICS. In: *International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb*. 2014. http://doi.org/10.1109/CISTEM.2014.7076989.

17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Multi-asymmetric modes of electric systems*. Irkutsk: Irkutsk State Transport University; 2005, 273 p. (In Russ.). EDN: PTVITA.

18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates. Moscow: Direct-Media; 2023, 156 p. (In Russ.). EDN: LIJPRI.

19. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Cherepanov A.V., Kryukov A.E., Seredkin D.A., Fesak I.A. *Modeling of three-phase traction power supply systems of AC railways*. Ekaterinburg: Ural State Transport University; 2023, 172 p. (In Russ.). EDN: NHDULR.

20. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Seredkin D.A. A consideration of harmonic distortions in modeling the electromagnetic fields generated by power lines feeding railway traction substations. *Elektrichestvo*. 2022;5:28-38. (In Russ.). http://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-5-28-38. EDN: RXGASM.

21. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Lyubchenko I.A. Integrated use of Smart Grid technologies in railway traction networks. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(5):1041-1052. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1041-1052. EDN: RNYCDC.

Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 96-106

2025;29(1):96-106

ISSN 2782-4004 (print)

ISSN 2782-6341 (online)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крюков Андрей Васильевич,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры электроснабжения
и электротехники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет;
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
профессор кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
аnd_kryukov@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-6543-1790

Середкин Дмитрий Александрович,

к.т.н., доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия dmitriy987@mail.ru

Воронина Екатерина Викторовна,

аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия eka7erina.voronina@yandex.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 15.12.2024 г.; одобрена после рецензирования 21.01.2025 г.; принята к публикации 18.02.2025 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey V. Kryukov,

Dr. Sci (Eng.), Professor, Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia; Professor of the Department of Transport Electrical Engineering, Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia ⊠ and_kryukov@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-6543-1790

Dmitry A. Seredkin,

Cand. Sci (Eng.), Associate Professor of the Department of Transport Electric Power Engineering, Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia dmitriy987@mail.ru

Ekaterina V. Voronina,

Postgraduate Student, Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia eka7erina.voronina@yandex.ru

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 15.12.2024; approved after reviewing 21.01.2025; accepted for publication 18.02.2025.

Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. 107-122 2025:29(1):107-122

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья УДК 537.868 EDN: BLIGHS DOI: 10.21285/1814-3520-2025-1-107-122

Конструирование и анализ мультифизической модели трёхфазного электромагнитного возбудителя низкочастотных колебаний с четырёхконтурным силовым модулем

И.Е. Туманов

¹Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Алма-Ата, Казахстан

Резюме. Целью научной разработки является создание реверсивной электрической машины переменного тока вращательного движения на основе четырехконтурного силового модуля электромагнитного возбудителя низкочастотных механических колебаний, являющегося электрической машиной возвратно-поступательного (колебательного) движения. Объектом исследований служит трехфазный электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний, силовой модуль которого состоит из спаренных четырех идентичных резонансных контуров. Контуры включают индуктивность и последовательно включенный конденсатор в цепь питания. Конструирование данной электрической машины проводили в программной среде COMSOL MULTIPHYSICS. Для преобразования частоты напряжения питания (50 Гц) во входной цепи в низкочастотный диапазон механических колебаний на выходе каждого силового модуля осуществлялась настройка параметров (последовательно включенных) индуктивности катушки и конденсатора на резонанс напряжений. Для создания усиленного вращающего момента спаренные контуры силовых модулей поочередно воздействуют на якорь, расположенный в центре по аналогии с электрическими машинами вращательного движения. Полученные в результате компьютерного моделирования анимации процессов биений входных высокочастотных сигналов внутри медленно изменяющейся синусоиды тягового усилия демонстрируют возможность их плавной модуляции в низкочастотной области на выходе. Также полученные данные демонстрируют возможность создания реверсивного вращательного движения якоря электромагнита при изменении полярности (направления движения электрических токов) соответствующих пар в резонансных контурах, выполненных с учетом допущения обусловленной линейности пассивных элементов в резонансных контурах электрической цепи переменного тока и линеаризации зависимости активных параметров от пассивных. Таким образом, можно рекомендовать следующие области применения электромагнитных возбудителей низкочастотных механических колебаний: в двигательном режиме функционирования - в качестве исполнительного органа в технологических процессах перемешивания и подготовки жидких продуктов до однородной консистенции, в генераторном - в качестве преобразователя энергии возобновляемых источников в электрическую.

Ключевые слова: электромагнитный возбудитель низкочастоных колебаний, вибродвигатель, двухтактный, трехфазный

Для цитирования: Туманов И.Е. Конструирование и анализ мультифизической модели трёхфазного электромагнитного возбудителя низкочастотных колебаний с четырёхконтурным силовым модулем // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 1. С. 107–122. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-107-122. EDN: BLIGHS.

POWER ENGINEERING

Original article

Design and analysis of a multiphysical model of a three-phase electromagnetic exciter of low-frequency oscillations with a four-circuit power module

Isakul E. Tumanov^{1⊠}

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan

Abstract. The creation of a reversible AC electric machine with rotary motion based on a four-circuit power module of an electromagnetic exciter of low-frequency mechanical oscillations, i.e., an electric machine of reciprocating (oscillatory) motion, represents a relevant research task. The research object includes a three-phase electromagnetic
2025;29(1):107-122

ISSN 2782-6341 (online)

exciter of low-frequency mechanical oscillations, whose power module consists of four paired identical resonant circuits. The circuits include an inductor and a capacitor connected in series in the power supply circuit. The design of this electric machine was carried out using the COMSOL MULTIPHYSICS software environment. In order to convert the frequency of the supply voltage (50 Hz) in the input circuit to the low-frequency range of mechanical oscillations at the output of each power module, the parameters of the series-connected inductance of the coil and capacitor were adjusted to achieve voltage resonance. In order to generate an increased torque, the paired circuits of the power modules alternately acted on the anchor located in the center by analogy with electric machines of rotary motion. The animations depicting the processes of beating of the input high-frequency signals inside a slowly changing sinusoid of the traction force obtained as a result of computer simulation demonstrate the possibility of their smooth modulation in the low-frequency region at the output. The obtained data also demonstrate the possibility of creating a reversible rotary motion of the electromagnet anchor when changing the polarity (direction of movement of electric currents) of the corresponding pairs in the resonant circuits, performed taking into account the assumption of conditioned linearity of passive elements in the resonant circuits of the alternating current electric circuit and the linearization of the dependence of active parameters on passive ones. The following areas of application of electromagnetic exciters of low-frequency mechanical vibrations can be recommended: (1) in the motor mode of operation, as an actuator in technological processes of mixing and preparing liquid products to a homogeneous consistency; (2) in the generator mode, as a converter of energy from renewable sources into electrical energy.

Keywords: electromagnetic exciter of low-frequency oscillations, vibration motor, two-stroke, three-phase

For citation: Tumanov I.E. Design and analysis of a multiphysical model of a three-phase electromagnetic exciter of low-frequency oscillations with a four-circuit power module. *iPolytech Journal.* 2025;29(1):107-122. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-107-122. EDN: BLIGHS.

ВВЕДЕНИЕ

Создателем электромагнитных возбудителей низкочастотных колебаний электромагнитного возбудителя низкочастотных механических колебаний (ЭМВ НЧК) и основоположником теории функционирования является Ю.Е. Нитусов. В технической литературе -«вибродвигатели серии типа МВТУ» (Московского высшего технического училища имени Н.Э. Баумана) [1]. Впервые схема такого преобразователя была предложена и описана им в журнале «Электричество» [1]. Направление исследований получило продолжение в личных трудах Ю.Е. Нитусова и трудах его талантливых учеников: А.И. Коцюбинского, Б.И. Крюкова, З.А. Кулиева, Н.М. Полякова, И.С. Бабаева, Р.А. Гасымова, Ф.А. Габараева и др.

В работах перечисленных авторов был исследован принцип использования «резонанса напряжений» в качестве инструмента для преобразования высокочастотных составляющих активных параметров электрической подсистемы на входе (напряжение питания, тока в цепи и магнитный поток) в низкочастотную составляющую активного параметра на выходе (тяговое усилие электромагнита) для всех типов и модификаций конструктивного исполнения ЭМВ НЧК: однофазный однотактный, однофазный двухтактный, однофазный с четырехсторонним воздействием на якорь электромагнита, трехфазный однотактный, трехфазный двухтактный и трехфазный с четырехсторонним воздействием²⁻⁸ на якорь электромагнита (рис. 1).



Рис. 1. Функциональная модель электромагнитного возбудителя низкочастотных механических колебаний как цепи последовательного преобразования электрической энергии питания в механическую работу

Fig. 1. Functional model of an electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations as a chain of electrical energy serial conversion into mechanical work

²А.с. № 1762371, СССР, А1, Н 02 К 33/14. Двухтактный электромагнитный вибратор / А.И. Коцюбинский, Ю.Е. Нитусов, В.А. Щербинин. Заявл. 20.03.90; опубл. 15.09.92. Бюл. № 34.

³А.с. № 1363392, СССР, А1, Н 02 К 33/12, В 06 В 1/04. Вибропривод / Ю.Е. Нитусов, А.И. Коцюбинский, Р.А. Гасымов. Заявл. 19.05.86; опубл. 30.12.87. Бюл. № 48.

⁴А.с. № 912476, СССР, В 23 Р 19/04. Устройство для вибрационной сборки изделий / Ю.К. Мялкин, Д.А. Кудасов, В.Я. Мялкина, Ю.Е. Нитусов. Заявл. 29.04.80; опубл. 15.03.82. Бюл. № 10.

Туманов И.Е. Конструирование и анализ мультифизической модели трёхфазного электромагнитного возбудителя... Tumanov I.E. Design and analysis of a multiphysical model of a three-phase electromagnetic exciter of low-frequency oscillations...

Области применения ЭМВ НЧК: в двигательном режиме функционирования – в качестве исполнительного органа в технологических процессах перемешивания и подготовке жидких продуктов до однородной консистенции [2], в генераторном – в качестве преобразователя энергии возобновляемых источников в электрическую [3]. Применение метода исследований – САПР (системы автоматизированного проектирования) в области электромеханики.

Целью научной разработки является конструирование реверсивной электрической машины переменного тока вращательного движения на основе четырехконтурного силового модуля электромагнитного возбудителя низкочастотных колебаний, являющегося электрической машиной возвратно-поступательного (колебательного) движения.

Для достижения цели необходимо решение следующих задач:

 выявить и определить аналогии между электрическими машинами вращательного движения и возвратно-поступательного движения и провести патентно-лицензионный поиск по базам патентов Союза Советских Социалистических Республик (СССР), Российской Федерации (РФ) и Республики Казахстан (РК) на предмет определения аналогов и прототипов исследуемого объекта;

 определить методы и выбрать инструменты для конструирования объекта исследования.

СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ

Модель будем создавать на основе аналогов и прототипов изобретений из базы патентов СССР⁸ и РК⁷.

Известно техническое решение по авторскому свидетельству⁸, в котором описан виброривод. В нем для расширения функциональных возможностей создаются сложные плоскостные траектории движения якоря в виде фигур Лиссажу. Вибропривод содержит две пары электромагнитов, расположенных

в паре друг против друга в перпендикулярных плоскостях по горизонталной и вертикальной осям. При этом первая обмотка электромагнита через конденсатор включается в блок питания, а противоположный - ко входу фазовращателя, к выходам которого подключаются через свои конденсаторы обмотки другой пары электромагнитов так, что силовое воздействие канала на якорь через фазовращатель не совпадает по времени с каналом, содерщащим электромагниты, расположенные по горизонтальной оси. Это временное рассогласование, определяемое углом сдвига фаз, и приводит к возникновению сложного плоскопараллельного движения якоря, закрепленного на упругой подвижной системе. В нашем случае для обеспечения вращательного движения якоря вместо упругой подвижной системы используем конструкцию свободного вращения якоря вокруг собственной оси.

При создании мультифизической модели будем руководствоваться следующей приципиальной схемой, в которой имеются 4 силовых вибромодуля по аналогии с электромагнитным вибратором⁷ и виброприводом⁹:

В качестве основного инструмента конструирования выбираем программный продукт Comsol Multiphysics.

Для реализации конструирования мультифизической модели ЭМВ НЧК в программной среде Comsol Multiphysics алгоритм действий следующий:

1. Установка и построение геометрической модели с четырехконтурным силовым модулем ЭМВ НЧК (рис. 2).

2. Описание физического принципа функционирования ЭМВ НЧК.

3. Определение и выбор конструкционных материалов элементов и модулей ЭМВ НЧК.

4. Определение уравнений физических процессов для построения конечно-элементной сетки для численного решения (Mesh).

5. Конструирование и создание модели в зависимости от формы и физики процессов (Moving Vesh).

https://ipolytech.elpub.ru

⁵А.с. № 1356136, СССР, А 1, Н02К 33/12, В06В 1/04. Электромагнитный вибратор / Ю.Е. Нитусов, А.И. Коцюбинский, И.С. Бабаев. Заявл. 02.10.85; опубл. 30.11.87. Бюл. № 44.

⁶А.с. № 1405099, СССР, А 1, Н 02 К 33/14. Двухтактный электромагнитный вибратор переменного тока / А.И. Коцюбинский, Б.И. Крюков, Ю.Е. Нитусов, Ф.А. Габараев. Заявл. 27.09.84; опубл. 23.06.88. Бюл. № 23.

⁷А.с. № 1727927, СССР, А 1, В 06 В 1/04. Электромагнитный вибратор / А.Г. Акчурин, Ю.Е. Нитусов, И.Е. Туманов, К.Б. Аспандияров. Заявл. 17.01.90; опубл. 23.04.92. Бюл. № 15.

⁸А.с. № 1332475, СССР, А 1, Н 02 К 33/02. Вибропривод / А.И. Коцюбинский, С.А. Коцюбинский, Ю.Е. Нитусов. Заявл. 27.09.84; опубл. 23.08.1987. Бюл. № 31.



Рис. 2. Принципиальная схема трехфазного электромагнитного возбудителя низкочастотных механических колебаний с четырехконтурным силовым модулем

Fig. 2. Schematic diagram of a three-phase electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations with a four-circuit power module

Выполняем пошагово все действия в соответствии с алгоритмом построения модели.

Шаг 1: построение геометрической модели. В конструкции якоря предусмотрим четыре полюсных наконечника, расположенных по диагонали равноудаленно так, чтобы при вращении якоря мы могли фиксировать его положение в любой момент времени. По четырем сторонам якоря расположим 4 спаренных электромагнита с трехфазным питанием (рис. 3).

При создании геометрии был выбран стержень с размерами: высота с плунжером – 75 мм; ширина – 45 мм; толщина – 15 мм. Размеры рулона: высота – 40 мм; ширина – 16 мм; количество обмоток – 500 шт.; диаметр проволоки – 1,5 мм (рис. 4, размеры приведены для одной фазы).



Рис. 3. Геометрическая модель трехфазного четырехконтурного силового модуля электромагнитного возбудителя низкочастотных механических колебаний

Fig. 3. Geometric model of a three-phase four-circuit power module of an electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations

Туманов И.Е. Конструирование и анализ мультифизической модели трёхфазного электромагнитного возбудителя... **Tumanov I.E.** Design and analysis of a multiphysical model of a three-phase electromagnetic exciter of low-frequency oscillations...

Название	Значения	Описание
em_w	100[mm]	Width, electromagnet
em_h	60[mm]	Height, electromagnet
core_w	30[mm]	Width, core
pl_h	15[mm]	Height, plunger
plunger_travel	6[mm]	Total stroke, plunger
Ν	500	Number of turns, primary coil
d	1.35[N*s/m]	Damping constant, return spring
kr	24.2[N/m]	Spring constant, return spring
10	plunger_travel*0.1	Undeformed length, contact spring
ор	plunger_travel*0.7	Opening, electrical contact
dc	2.7[mm]	Diameter, shading coil
kc	255[N/m]	Spring constant, contact spring
С	7[N*s/m]	Damping coefficient, contact spring

Рис. 4. Задание геометрических параметров модели для одного контура силового модуля **Fig. 4.** Setting geometric parameters of the model for one contour of the power module

Шаг 2: Описание физического принципа функционирования ЭМВ НЧК, постановка задачи и настройка физического интерфейса. Задачей данного моделирования было исследование условий резонанса и создание рабочей схемы вибродвигателя. Граничные условия для модели задаются при настройке физического интерфейса. Между плунжером и штоком добавляется пружинный демпфер. Задаются параметры обмотки и питание обмотки конденсатора (рис. 5).

Поскольку на якорь воздействует трехфазный Ш-образный электромагнит с трехфазным симметричным питанием, то на выходе системы мы должны получить гармонический синусоидальный сигнал вращательного движения якоря (рис. 6).



Рис. 5. Настройка физического интерфейса и граничных условий **Fig. 5.** Setting up physical interface and boundary conditions

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

2025. T. 29. № 1. C. 107-122 2025;29(1):107-122

iPolytech Journal

Крутящий момент (Н*м) График напряжения (V) 400 1 Фаза (V) 800 350 2 Фаза (V) 700 300 3 Фаза (V) 600 250 500 200 400 150 300 100 200 50 100 ž 0 iron_th=10 mm, DC ток параметрический 0 -100 -50 -200 -100 -300 -150 -400 -200 -500 -250 -600 -300 -700 -350 -800 -400 40 Angle (°) 0 0.2 0.4 0.6 0.8 10 20 50 60 70 0 30 Время (s)

Рис. 6. Гармонические входные и выходные параметры мультифизической модели Fig. 6. Harmonic input and output parameters of a multiphysical model

Картина силовых линий магнитного потока одной пары показана на рис. 7.





Туманов И.Е. Конструирование и анализ мультифизической модели трёхфазного электромагнитного возбудителя... Tumanov I.E. Design and analysis of a multiphysical model of a three-phase electromagnetic exciter of low-frequency oscillations...

Шаг 3: Выбор конструкционных материалов. Воздух (желтая часть) – «Воздух» в разделе «Материалы» относится к заранее определенному материалу по его физическим свойствам, таким как плотность, теплопроводность и теплоемкость. «Мягкое железо» (серая и синяя части) представляет собой определенный материал с соответствующими магнитными и физическими свойствами, такими как высокая магнитная проницаемость и низкая коэрцитивная сила. «Алюминий» (красная часть) – это материал с высокой проводимостью, который может эффективно проводить электричество, сводя к минимуму потери энергии (рис. 8).

Шаг 4: Определение уравнений физических процессов для построения конечноэлементной сетки для численного решения (Mesh). Переходные модели включают в себя вычисление изменяющегося во времени решения. Для этого программа запускается с заданными начальными условиями и рассчитывает эволюцию неизвестных, используя одну из нескольких различных схем интегрирования по времени. Иногда они собираются медленно или не собираются вовсе. В данной статье приведены рекомендации необходимых действий в таких ситуациях.

Эти уравнения могут представлять собой набор независимых обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) или набор связанных уравнений, возникающих в результате пространственной дискретизации краевой задачи с использованием метода конечных элементов. Большинство задач COMSOL, решающих для полей, изменяющихся во времени и пространстве, относится ко второй категории. Вместе с приведенным выше уравнением программа может рассматривать набор общих алгебраических уравнений: M(u,t) = 0 и эти две системы уравнений.

Дифференциально-алгебраические уравнения (ДАУ) образуют систему. Именно эта система ДАУ полностью определяет модель перехода u_unit с набором начальных условий. Следует также отметить, что можно рассматривать модели с большим количеством производных по времени, которые просто требуют введения дополнительных промежуточных переменных. Добавлены два узла, связанных



Рис. 8. Выбор конструкционных материалов на примере одной фазы контура силового модуля **Fig. 8.** Selection of structural materials for the case of one phase of the power module circuit

Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 107-122

2025;29(1):107-122

с движущейся сеткой во время создания сетки: деформируемая область и граничное условие «Symmetry/Roller». Механическое перемещение контактного элемента использовалось во избежание полного закрытия воздушных отверстий, поскольку такое изменение топологии было несовместимо с подвижной сеткой (в вентиляционных отверстиях). Кроме того, поскольку сетка (рис. 9) становится более искаженной при закрытии отверстий, следует включить опцию автоматического отключения в узле шага исследования [4–13].

Шаг 5: Конструирование и создание модели в зависимости от формы и физики процессов (Moving Vesh). В ходе исследования и создания данной модели были получены графики изменения силы тока и перемещения плунжера. В результате мы можем проанализировать изменения тока в основной и затеняющей (короткозамкнутой) катушках (рис. 10).

В соответствии с резонансом напряжений в силовом контуре индуктивное сопротивление (XI) и емкостное сопротивление (Хс) в электрической цепи равны друг другу по модулю, такое состояние называется равновесием. В данном случае добротность (безразмерный параметр, который показывает насколько сильно ослаблены генератор или резонатор) описывает, насколько быстро затухают колебания в цепи после выключения источника колебаний. Чем выше добротность, тем медленнее затухают колебания. В случае равенства модулей XI = Хс добротность контура достигает максимального значения, т.е. колебания в контуре затухают очень медленно. Это состояние используется во многих приложениях, таких как проектирование резонансных цепей, содержащих резонансные контуры.

После выполнения всех этапов моделирования трехфазного четырехконтурного силового модуля на базе ЭМВ НЧК можем посмотреть анимации вращательного движения якоря (рис. 11–14).



Рис. 9. Конечно-элементная сетка для одной пары трехфазного силового контура **Fig. 9.** Finite element grid for one pair of a three-phase power circuit

Туманов И.Е. Конструирование и анализ мультифизической модели трёхфазного электромагнитного возбудителя... **Tumanov I.E.** Design and analysis of a multiphysical model of a three-phase electromagnetic exciter of low-frequency oscillations...



Рис. 10. Графики изменения тока и величины смещения плунжера в обмотке катушки для одной пары контуров силового модуля

Fig. 10. Graphs of current and coil winding plunger displacement value variations for one pair of the power module circuits

ЭМВ НЧК с четырехконтурным силовым модулем отличается от одноконтурного и двух-контурного тем, что вместо возвратно-посту-

пательного (колебательного) якорь совершает реверсивное вращательное движение, как в синхронной машине переменного тока.



Рис. 11. Анимация вращательного движения якоря четырехконтурного силового модуля в начальном положении (слева – вращение по часовой стрелке, справа – вращение против часовой стрелки) **Fig. 11.** Animation of four-circuit power module armature rotation in the initial position (left – clockwise rotation, right – counterclockwise rotation)



Рис. 12. Анимация вращательного движения якоря (слева (a, c, e) – по часовой стрелке, справа (b, d, f) – против часовой стрелки)

Fig. 12. Animation of armature rotation (left (a, c, e) – clockwise rotation, right (b, d, f) – counterclockwise rotation)

Функцию реверса выполняем в соответствии с [11]. Анализ анимаций осциллограмм процесса биений и модуляции колебаний резонансного контура – при разных значениях частоты, индуктивности катушки и емкости конденсатора.

Анализ анимаций осциллограмм показывает, что при стабильно неизменной индуктивности катушки (0,1 Гн) электромагнита при пошаговом (1 шаг 5 Гц) уменьшении частоты колебаний от 15 Гц до 1 Гц и увеличении емкости конденсатора (от 1 мкФ до 340 мкФ) наиболее плавный процесс модуляции колебаний наступает при частоте 1 Гц и емкости конденсатора 340 мкФ (рис. 13). Визуальные анимации колебательных движений якоря электромагнита (рис. 14–16)



Рис. 13. Осциллограмма процесса биений и модуляции колебаний при частоте 1 Гц, индуктивности 0,1 Гн, емкости конденсатора 340 мкФ

Fig. 13. Oscillogram of oscillation beating and modulation at the frequency of 1 Hz, inductance of 0.1 H, capacitor capacitance of 340 μ F



Рис. 14. Осциллограмма процесса биений и модуляции колебаний при частоте 5 Гц, индуктивности 0,1 Гн, емкости конденсатора 9,5 мкФ

Fig. 14. Oscillogram of oscillation beating and modulation at a frequency of 5 Hz, inductance of 0.1 H, capacitor capacitance of 9.5 μ F

https://ipolytech.elpub.ru



2025. T. 29. № 1. C. 107-122 2025;29(1):107-122

Polytech Journal

ISSN 2782-6341 (online)



Рис. 15. Осциллограмма процесса биений и модуляции колебаний при частоте 10 Гц, индуктивности 0,1 Гн, емкости конденсатора 2,5 мкФ

Fig. 15. Oscillogram of oscillation beating and modulation at a frequency of 10 Hz, inductance of 0.1 H, capacitor capacitance of 2.5 μ F





Fig. 16. Oscillogram of oscillation beating and modulation at a frequency of 15 Hz, inductance of 0.1 H, capacitor capacitance of 1 μ F

показывают периодический процесс устойчивого появления и исчезновения резонанса напряжений [14-21]. Процесс вращательного движения якоря становится возможным благодаря поочередному воздействию пары сил (вращающий момент) четырехконтурного силового модуля ЭМВ НЧК (см. рис. 6). **Туманов И.Е.** Конструирование и анализ мультифизической модели трёхфазного электромагнитного возбудителя... **Tumanov I.E.** Design and analysis of a multiphysical model of a three-phase electromagnetic exciter of low-frequency oscillations...

Рассмотрим анимации резонансных кривых при различных значениях добротности Q колебательного контура. Таким образом, сгенерированная сетка показана на рис. 8, анализ анимаций резонансных кривых – на рис. 17–19.



Рис. 17. Анимации резонансных кривых при добротности колебательного контура Q = 0,5 (слева) и Q = 1 (справа) **Fig. 17.** Animations of resonant curves with the tuned circuit Q-factor: Q = 0.5 (left) and Q = 1 (right)



Рис. 18. Анимации резонансных кривых при добротности колебательного контура Q = 6 (слева) и Q = 12 (справа) **Fig. 18.** Animations of resonant curves with the tuned circuit Q-factor: Q = 6 (left) and Q = 12 (right)



Рис. 19. Анимации резонансных кривых при добротности колебательного контура Q = 0,1 (слева) и Q = 15 (справа) **Fig. 19.** Animations of resonant curves with the tuned circuit Q-factor: Q = 0.1 (left) and Q = 15 (right)

iPolytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 107-122 2025:29(1):107-122

ISSN 2782-4004 (print)

На основе полученных результатов можно констатировать, что цель исследования – конструирование реверсивной электрической машины переменного тока на базе четырехконтурного силового модуля ЭМВ НЧК достигнута на основе мультифизического моделирования в COMSOL Multiphysics.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В электромеханической системе подтвержден принцип преобразования высокочастотной составляющей на ее входе в низкочастотную составляющую на выходе при обеспечении условия – сохранение энергии и мощности при соответствующих преобразованиях – для этой модификации двухконтурного и четырехконтурного силового модуля ЭМВ НЧК при его трехфазном питании.

На основе функциональной модели с четырехконтурным силовым модулем выполнено конструирование электрической машины переменного тока вращательного движения из составных частей (силовых модулей) машины возвратно-поступательного движения (ЭМВ НЧК). На основе мультифизического моделирования осуществлено корректное представление и визуализация картин колебательных движений якоря ЭМВ НЧК с двухконтурным силовым модулем, также сгенерирована конечно-элементная сетка модели, подтверждающая алгоритм моделирования и выбор исходных данных объекта.

На основе двухконтурной модели построена мультифизическая модель ЭМВ НЧК с четырехконтурным силовым модулем, отличающимся от предыдущих исходных модификаций вращательным типом движения по аналогии с синхронными машинами переменного тока.

Анимации и визуализация динамических процессов коррелируют с граничными условиями и теоретическими выкладками при определении активных и пассивных параметров электромеханической системы.

Актуальность задач и важность продолжения исследований подтверждены инновационными патентами РК и свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ РосПатента РФ⁹⁻¹¹, опубликованных в 2025 г.

Список источников

1. Нитусов Ю.Е. Об одной схеме электромагнитного вибратора // Электричество. 1956. № 5. С. 81-84.

2. Туманов И.Е. Параметрический электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний для систем контроля, измерения и дозирования массы многофракционных жидких продуктов // Электротехника. 2013. № 8. С. 48–51. EDN: QIRCRJ.

4. Tumanov I.E., Orynbayev S.A., Baibutanov B., Kruglikov A., Kaceico P. Modeling of physical subsystem using an example of electromagnetic exciter of low-frequency oscillations // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 736. P. 97–102. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.736.97.

5. Nurimbetov A., Bekbayev A., Orynbayev S., Baibutanov B., Tumanov I., Keikimanova M. Optimization of windmill's layered composite blades to reduce aerodynamic noise and use in construction of "green" cities // International scientific Conference Urban civil Engineering and Municipal facilities (Spbucemf-2015): Procedia Engineering. 2015. Vol. 117. P. 273–287. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.162. EDN: UZYEBZ.

6. Каржавов Б.Н. Апроксиматоры синусоидальных функций в электроприводах с управляемым моментом в исполнительных двигателях // Электричество. 2015. № 9. С. 39–47.

7. Назаров А.И., Ибадуллаев М.И., Тилляходжаев М.М. Структурная схема электромагнитного вибровозбудителя с амплитудно-частотным управлением // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. 2016. № 3-4. С. 55–59.

^{3.} Туманов И.Е. Электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний. Вопросы теории, моделирования, разработки и прикладной значимости // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 1. С. 83–92. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2021_1_83. EDN: FKFEXX.

⁹Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025613484, Российская Федерация. Программа для построения, визуализации анализа физических процессов в преобразователе механиеских колебаний в электрический сигнал на выходе / И.Е. Туманов, К.В. Кенден; правообладатель Кенден Кара-Кыс Вадимовна. Дата поступления 04.02.2025; дата гос. регистрации в реестре 12.02.2025.

¹⁰Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025613576, Российская Федерация / И.Е. Туманов, К.В. Кенден; правообладатель Кенден Кара-Кыс Вадимовна. Дата поступления 04.02.2025; дата гос. регистрации в реестре 12.02.2025.

¹¹Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025613810, Российская Федерация / И.Е. Туманов, К.В. Кенден; правообладатель Кенден Кара-Кыс Вадимовна. Дата поступления 04.02.2025; дата гос. регистрации в реестре 17.02.2025.

Туманов И.Е. Конструирование и анализ мультифизической модели трёхфазного электромагнитного возбудителя...

Tumanov I.E. Design and analysis of a multiphysical model of a three-phase electromagnetic exciter of low-frequency oscillations...

8. Афанасьев А.И., Закаменных Ю.Г. Анализ энергозатрат резонансных вибротранспорт ных машин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2008. № 8. С. 107–109. EDN: KVXSWF.

9. Нуралиев А.К., Есенбеков А.Ж., Ибадуллаев М.И. Математическая модель электромагнитного вибратора с источником питания на основе инвертора // Вестник Московского энергетического института. 2022. № 1. С. 94–97. https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-1-94-97.

10. Ибадуллаев М.И., Нуралиев А.К., Есенбеков А.Ж., Назаров А.И. Резонансный электромагнитный вибровозбудитель колебаний с обратной связью // Вестник Московского энергетического института. 2020. № 1. C. 62–66. https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-1-62-66. EDN: GAVDKN.

11. Туманов И.Е. Параметрический синтез механической характеристики электромагнитного возбудителя низкочастотных колебаний на основе методов аналитической геометрии и его мультифизическое моделирование // Главный механик. 2023. № 11. С. 642–647.

12. Гаррис М., Лауренсон П., Стефенсон Дж. Системы относительных единиц в теории электрических машин / пер. с англ. В.Я. Беспалова. М.: Энергия, 1975. 120 с.

13. Ибадуллаев М.И., Тилляходжаев М.М., Абдуллаев Д.А. Определение структурных схем ЭВМ с автоматической настройкой на резонанс // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. 2011. № 1-2. С. 136–140.

14. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. Режим доступа: http://lib.ysu.am/open_books/37978.pdf (дата обращения: 30.09.2024).

15. Красильников П.С., Байков А.Е., Чуркина Т.Е. Прикладные методы исследования нелинейных колебаний: монография. Ижевск: АНО «ИИКИ», 2015. 528 с. EDN: VEYXHP.

16. Боголюбов Н.Н., Крылов Н.М. Собрание научных трудов. Т. 2: Математика и нелинейная механика. Нелинейная механика / отв. ред. А.Д. Суханов. М.: Наука, 2005. 828 с.

17. Борисов А.В., Мамаев И.С. Динамика твердого тела: монография. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. EDN: TLWBKL.

18. Безгласный С.П. Управление движениями параметрического маятника // Известия Саратовского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2015. Т. 15. № 1. С. 67–73. https://doi.org/10.18500/1816-9791-2015-15-1-67-73. EDN: TMMCLN.

19. Bardin B.S. On nonlinear motions of a Hamiltonian system in the case of external resonance // Reports on Mathematical Physics. 2002. Vol. 49. No. 2-3. P. 133–142. https://doi.org/10.1016/S0034-4877(02)80013-1. EDN: LHGJDD.

20. Акуленко Л.Д., Нестеров С.В. Устойчивость равновесия маятника переменной длины ПММ // Прикладная математика и механика. 2009. Т. 73. № 6. С. 893–902. EDN: KXXQTX.

21. Антипов В.И., Ефременков В.В., Руин А.А., Субботин К.Ю. Повышение эффективности работы вибрационных механизмов за счет возбуждения низкочастотного резонансного режима колебаний // Стекло и керамика. 2007. Т. 80. № 5. С. 13–16.

References

1. Nitusov Yu.E. On a circuit of an electromagnetic vibrator. *Elektrichestvo.* 1956;5:81-84. (In Russ.).

2. Tumanov I.E. Parametric electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations for systems for monitoring, measuring and multi-fraction liquid product mass batching. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*. 2013;8:48-51. (In Russ.). EDN: QIRCRJ.

3. Tumanov I.E. Electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations. questions of theory, modeling, development and application significance. *Smart Electrical Engineering*. 2021;1:83-92. (In Russ.). https://doi.org/10.46960/2658-6754_2021_1_83. EDN: FKFEXX.

4. Tumanov I.E., Orynbayev S.A., Baibutanov B., Kruglikov A., Kaceico P. Modeling of physical subsystem using an example of electromagnetic exciter of low-frequency oscillations. *Applied Mechanics and Materials*. 2015;736:97-102. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.736.97.

5. Nurimbetov A., Bekbayev A., Orynbayev S., Baibutanov B., Tumanov I., Keikimanova M. Optimization of windmill's layered composite blades to reduce aerodynamic noise and use in construction of "green" cities In: *International scientific Conference Urban civil Engineering and Municipal facilities* (Spbucemf-2015): Procedia Engineering. 2015;117:273-287. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.162. EDN: UZYEBZ.

6. Karzhavov B.N. Approximators of sinusoidal functions in electric drives with controlled torque in actuators. *Elektrichestvo*. 2015;9:39-47. (In Russ.).

7. Nazarov A.I., Ibadullaev M.I., Tillyahodzhaev M.M. Structural diagram of an electromagnetic vibration exciter with amplitude-frequency control. *Problems of energy and sources saving*. 2016;3-4:55-59. (In Russ.).

8. Afanasyev A.I., Zakamennykh A.Yu. Analysis of power consumption by resonance vibrotransport machines. *Minerals and Mining Engineering*. 2008;8:107-109. (In Russ.). EDN: KVXSWF.

9. Nuraliev A.K., Esenbekov A.Zh., Ibadullaev M.I. Mathematical model of an electromagnetic vibrator with an inverterbased power source. *Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2022;1:94-97. (In Russ.). https://doi.org/ 10.24160/1993-6982-2022-1-94-97.

10. Ibadullaev M.I., Nuraliev A.K., Esenbekov A.Zh., Nazarov A.I. A resonant electromagnetic vibration exciter of oscillations with a feedback *Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2020;1:62-66. (In Russ.). https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-1-62-66. EDN: GAVDKN.

https://ipolytech.elpub.ru -

Polytech Journal 2023. 11. 29. 10. 1 2025;29(1):107-122

ISSN 2782-6341 (online)

11. Tumanov I.E. Parametric synthesis of the mechanical characteristic of an electromagnetic exciter of low-frequency oscillations based on analytical geometry methods and its multiphysical modeling. *Chief Mechanical Engineer*. 2023;11:642-647. (In Russ.).

12. Harris M.R., Lawrenson P.J., Stefenson J.M. Per-unit systems: with special reference to electrical machines. Cambridge University Press, 1970. (Russ. ed.: *Sistemy otnositel'nyh edinic v teorii elektricheskih mashin.* Moscow: Energiya; 1975, 120 p.)

13. Ibadullaev M.I., Tillyahodzhaev M.M., Abdullaev D.A. Determination of computer structural circuits with automatic resonance tuning. *Problems of energy and sources saving*. 2011;1-2:136-140. (In Russ.).

14. Bogolyubov N.N., Mitropol'skij Yu.A. Asymptotic methods in the theory of nonlinear oscillations. Available from: http://lib.ysu.am/open_books/37978.pdf [Accessed 30th September 2024]. (In Russ.).

15. Krasil'nikov P.S., Bajkov A.E., Churkina T.E. *Applied methods for studying nonlinear oscillations*. Izhevsk: Izhevsk Institute of Computer Science; 2015, 528 p. (In Russ.). EDN: VEYXHP.

16. Bogolyubov N.N., Krylov N.M. Collection of Scientific Works. Vol. 2: Mathematics and Nonlinear Mechanics. Nonlinear Mechanics. Moscow: Nauka; 2005, 828 p. (In Russ.).

17. Borisov A.V., Mamaev I.S. Solid body dynamics. Izhevsk: Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika; 2001. 378 p. (In Russ.). EDN: TLWBKL.

18. Bezglasnyj S.P. On control of motion of a parametric pendulum. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics.* 2015;15(1):67-73. (In Russ.). https://doi.org/10.18500/1816-9791-2015-15-1-67-73. EDN: TMMCLN.

19. Bardin B.S. On nonlinear motions of a Hamiltonian system in the case of external resonance. *Reports on Mathematical Physics*. 2002;49(2-3):133-142. https://doi.org/10.1016/S0034-4877(02)80013-1. EDN: LHGJDD. 20. Akulenko L.D., Nesterov S.V. The stability of the equilibrium of a pendulum of variable length. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2009;73(6):893-902. (In Russ.). EDN: KXXQTX.

21. Antipov V.I., Efremenkov V.V., Ruin A.A., Subbotin K.Yu. Improving vibration mechanisms efficiency by excitation of low-frequency resonant oscillation mode. *Glass and Ceramics*. 2007;80(5):13-16. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Туманов Исакул Елегенович,

к.т.н., доцент, доцент кафедры теплофизики и технической физики, Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, 050040, г. Алма-Ата, проспект Аль-Фараби, 71, Казахстан ⊠ isa.tumani56@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-9874-5788

Заявленный вклад автора

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

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию г.; одобрена после рецензирования 25.12.2024 г.; принята к публикации 21.02.2025 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Isakul E. Tumanov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Thermal Physics and Technical Physics, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al- Farabi Ave., Almaty 050040, Republic of Kazakhstan ⊠ isa.tumani56@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-9874-5788

Author contribution

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

Conflict of interests

The author declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 26.11.2024; approved after reviewing 25.12.2024; accepted for publication 21.02.2025.

Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. 123-132 2025;29(1):123-132

METALLURGY

Original article EDN: IOWITS DOI: 10.21285/1814-3520-2025-1-123-132



A procedure for preparing carbonaceous cyanidation tailings for gold fire assay

Alexander V. Byvaltsev¹, Grigoriy I. Voiloshnikov², Olga D. Khmelnitskaya³

¹⁻³Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

Abstract. The aim is to develop a procedure for gold analysis of carbonaceous ore cyanidation tailings bearing gold in an adsorbed form. The proposed procedure includes high-temperature washing of the solid phase of tailings using a filter followed by transferring the adsorbed gold to the washing solution. The filtrate is analyzed separately, the solid phase undergoes standard fire assay, and the total gold grade is calculated by summing the gold in the solution and that in the solid phase. Using the proposed procedure, the proportion of adsorbed gold not detected by standard fire assay decreased by 4.1 times, from 38.2% to 9.3%. The studies were conducted using additions of gold solutions with a gold balance estimation. This additionally allowed gold adsorption isotherms to be studied by natural carbonaceous matter under cyanidation tailings, the adsorbed gold value was significant at the level of 0.1–1.1 g/t. These gold losses are directly determined by the preg-robbing activity of the raw material. The K constant of Freundlich isotherms plotted as the Au loading of organic carbon, g/t vs Au concentration, mg/dm³ was 303–3037 g/t, which is only an order of magnitude lower than that for commercial activated carbons. However, the greater mass of natural carbonaceous matter and its extended surface result in substantial gold losses with cyanidation tailings. The developed analytical procedure can be used to refine the actual gold losses with cyanidation tailings of carbonaceous raw materials.

Keywords: gold, cyanidation tailings, preg-robbing activity, carbonaceous matter, fire assay

For citation: Byvaltsev A.V., Voiloshnikov G.I., Khmelnitskaya O.D. A procedure for preparing carbonaceous cyanidation tailings for gold fire assay. *iPolytech Journal.* 2025;29(1):123-132. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-123-132. EDN: IOWITS.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья УДК 669.213.63:543.57

Методика подготовки углистосодержащих хвостов цианирования к пробирному анализу золота

А.В. Бывальцев¹, Г.И. Войлошников², О.Д. Хмельницкая³

¹⁻³Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – разработка методики анализа золота в хвостах цианирования углистосодержащих руд, содержащих золото в сорбированной форме. В предлагаемой методике перевод сорбированного золота в раствор осуществлялся путем высокотемпературной отмывки твердой фазы хвостов на фильтре. При этом фильтрат анализируется отдельно, твердая фаза подвергается стандартному пробирному анализу, а расчет содержания золота в исходном образце ведется по сумме золота в растворе и твердой фазе. По испытанной методике, доля сорбированного золота, неопределяемого пробирным анализом, в среднем снизилась с 38,2 до 9,3% – в 4,1 раза. Исследования проведены методом добавок известного количества золота, что, кроме основной цели, позволило изучить изотермы сорбции золота природным углистым веществом в условиях цианирования. Показано, что при концентрации золота в жидкой фазе пульпы на уровне 0,01–0,05 мг/дм³, характерной для хвостов цианирования промышленных предприятий, доля сорбированного золота составила 0,1–1,1 г/т. Данные потери Аu напрямую определяются сорбционной активностью сырья. Коэффициент К изотерм Фрейндлиха, построенных в виде зависимости содержания Au в углистом веществе (в г/т) от концентрации Au в жидкой фазе (в мг/дм³), составил 303–3037, что лишь на порядок ниже, чем для товарных образцов активных углей. Однако превосходящее количество природного углистого вещества и его развитая поверхность предопределяют высокие потери золота с хвостами цианирования. Разработанная методика

https://ipolytech.elpub.ru -

[©] Byvaltsev A.V., Voiloshnikov G.I., Khmelnitskaya O.D., 2025

2025:29(1):123-132

ISSN 2782-6341 (online)

анализа может быть использована для уточнения реальных потерь золота с хвостами цианирования углистосодержащего сырья.

Ключевые слова: золото, хвосты цианирования, сорбционная активность, углистое вещество, пробирный анализ

Для цитирования: Бывальцев А.В., Войлошников Г.И., Хмельницкая О.Д. Методика подготовки углистосодержащих хвостов цианирования к пробирному анализу золота // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 1. С. 123–132. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-123-132. EDN: IOWITS.

INTRODUCTION

Studies show that preg-robbing ores and ore processing products cannot be easily processed by cyanidation and require additional treatment to increase gold recovery⁴ [1-13]. The chemical analysis of preg-robbing ores and ore processing products can be challenging since the results of gold fire assay are often lower than actual [14-17]. The authors explain the difference by the volatility of carbonaceous gold species at a temperature above 300°C. An improved procedure was developed to determine gold in the samples of preg-robbing ores and ore processing products by fire assay [18]. The procedure includes the pretreatment of samples by roasting with the addition of calcium and barium oxides and peroxides which minimize the formation of gaseous carbon and sulphur oxides and the losses of gold species with gases during fire assay.

Irgiredmet has been studying preg-robbing ores and ore processing products for many years. The institute discovered that the results of the gold fire assay are lower than actual when the tailings of preg-robbing ore cvanidation are analyzed [19]. Fire assay often cannot determine up to 50% of gold adsorbed by the solid phase during cyanidation. The authors explain the difference between fire assay results and actual gold content by the presence of gold in the solid phase in the adsorbed form, i.e. nonmetallic, atomized state. A fraction of atomized gold does not form any large enough metallic particles during the analysis. Also, it does not get wet by lead and remains encapsulated by borosilicate slags in the form of a real solution or nanoscale inclusion causing the erroneous results of fire assay. Similarly, this assumption is confirmed by lower fire assay results when the evaporated samples of cyanidation tailings are analyzed that consist of non-preg-robbing ores without organic carbon and carbonaceous gold species but contain some gold in a nonmetallic form before fire assay.

The studies were carried out to improve the accuracy of fire assay when it comes to the cyanidation tailings of preg-robbing ores and ore processing products. The method involves the recovery of hard-to-determine detect adsorbed gold from the solid phase into solution. The solution is analyzed for gold separately. Then, the solid phase is analyzed by standard fire assay. The gold content in the feed sample is calculated by summing gold in the solution and the solid phase. The high-temperature washing of the solid phase was tested to recover adsorbed gold from the samples before fire assay. The solid phase is washed using a filter. The slurry is heated to 90°C and retained for a certain time followed by the filtration and washing of cake with heated water or a specific solution using a filter. Increasing water temperature reduces the preg-robbing of the solid phase. The equilibrium distribution of gold also decreases and shifts towards the solution while absorbed gold transfers to the liquid phase of the slurry. In addition to temperature, the method involves the washing of cake with heated water which contains no gold. As a result, the equilibrium further shifts towards the solution and the extra-elution of adsorbed gold takes place. The method has been already patented by the authors for commercial application [20] but it can be also practical for analytical purposes.

OBJECTIVE OF STUDY

The objective of the study was to investigate gold adsorption from cyanide solutions by natural carbonaceous matter and develop a procedure for the analysis of gold in carbonaceous cyanidation tailings.

MATERIALS AND METHODS

The materials of the study were the cyanidation tailings of preg-robbing ores and ore

⁴Suzdal: Launch of HiTeCC Technology. Available from: https://minedocs.com/20/Suzdal_Presentation_06282016.pdf [Accessed 25th September 2024].

Byvaltsev A.V., Voiloshnikov G.I., Khmelnitskaya O.D. A procedure for preparing carbonaceous cyanidation tailings for gold... Бывальцев А.В., Войлошников Г.И., Хмельницкая О.Д. Методика подготовки углистосодержащих хвостов цианирования...

processing products from four mines in Russia. The chemical composition and size distribution of the products are summarized in Table 1. The experimental procedure included the "contamination" of samples with a specified quantity of gold. Then, a fraction of each sample was divided into two parts. One part was analyzed by direct fire assay with atomic absorption spectrometry (AAS) finish while another part was subjected to high-temperature washing followed by the analysis of a resulting solution and the fire assay of a washed sample with AAS finish.

Preparations. All cyanidation tailings had been produced during "standard" static laboratory experiments under the following conditions: each subsample mass of 1.00 kg; temperature of 22-24 °C; pH (slurry) = 10.8–11.2 (adjusted by the addition of CaO); NaCN concentration of 1–2 g/dm³; liquid-to-solid ratio (L/S) = 2:1; cyanidation time of 48 h; fresh activated carbon addition of 10 vol. %.

After "standard" cyanidation at room temperature, activated carbon had been replaced by fresh adsorbent followed by high-temperature treatment under the same conditions except temperature (85–90°C) and time (3 hours). Then, activated carbon was again replaced by fresh one followed by the second stage of high-temperature treatment. The purpose of these manipulations was to maintain the integrity of the experiments, i.e. to maximize the recovery of adsorbed gold from cyanidation tailings. The tailings of high-temperature treatment contained 0.33–2.76 g/t of gold. It was presumed that this gold was finely disseminated in minerals and could not be leached with cyanide.

After the separation of activated carbon, the slurry was cooled and sampled (~10% of the slurry volume) for the analysis of gold content in solid and liquid phases (3 replicates), see Table 1. The gold concentration in the liquid phase was below the detection limit (<0.005 mg/dm³) and assumed as 0 mg/dm³ in calculations.

Main experiments. The cake of each cyanidation tailings slurry sample was divided into 5 equal parts (0.18 kg of solids each) and mixed with the various quantities of synthetic Na[Au(CN)₂] solution containing 86.2 mg/dm³ of gold. Then, the samples were agitated at room temperature for 48 hours to adsorb gold by the solid phase. After agitation, 1/2 (0.09 kg of solids) of each slurry sample was collected and filtered using a Buchner filter funnel. The filtrate was subjected to AAS for gold analysis. The wet cake was weighted, dried to a constant mass at 105 °C, and analyzed for initial moisture content calculated by weight loss. The dry

 Table 1. Characteristics of the studied carbonaceous preg-robbing cyanidation tailings

 Таблица 1. Характеристики исследованных углистых сорбционно-активных хвостов цианирования

Product characteristics		Value						
Product		Ore cyanidation tailings – Mine 1	Ore cyanidation tailings – Mine 2	Tailings of gravity tailings cyanidation – Mine 3	Tailings of flotation concentrate cyanidation – Mine 4			
Name		Product 1	Product 2	Product 3	Product 4			
	SiO ₂ , %	67.8	76.4	61.9	41,5			
	Al ₂ O ₃ , %	14.2	12.4	18.4	11,2			
Component	Fe _{tot} , %	3.40	4.18	1.16	15,4			
	S _{tot} , %	0.40	0.55	0.27	11,9			
	C _{org} , %	0.34	0.60	0.52	2,8			
	Au*, g/t	0.33	0.56	0.45	2,76			
Mass fraction of -0,071 mm size, %		89	94	95	98			
Mass fraction of -0,16 mm size, %		100	100	100	100			
Slurry L/S		2:1	2:1	2:1	2:1			
Slurry pH		10,9	,9 11.0 11.2		11.0			
NaCN concentration in liquid phase, g/dm ³		1,2	1.8	1.5	1.1			
Au concentration in liquid phase, mg/dm ³		<0.005	<0.005	<0.005	<0.005			

Note: Au content after two stages of cyanidation tailings treatment by high-temperature adsorption process.

iPolytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 123-132 2025:29(1):123-132

ISSN 2782-4004 (print)

ISSN 2782-6341 (online)

cake was subjected to gold fire assay with AAS finish (3 replicates); the results were averaged.

The second part of each "gold-contaminated" sample (0.09 kg of solids) was washed at high temperature to recover adsorbed gold into solution and calculate the quantity of recovered Au. For this purpose, the slurry was heated to 90°C and retained at this temperature for 10 min. Then, the slurry was collected and filtered using a heated Buchner filter funnel and washed with 0.20 L of water heated to 90°C combining barren and washing filtrates. After measuring the volume of each combined filtrate, it was subjected to AAS for gold analysis. The washed cake was dried to a constant mass at 105°C and subjected to gold fire assay with AAS finish (3 replicates); the results were averaged. The gold content in the solid phase before washing was calculated summing precious metal contained in filtrate and washed cake and normalized to the initial sample mass. Table 2 summarizes the results of gold washing from the solid phase.

The time of bullion smelting was 45 min at 1080°C. Flux composition was as follows (per 25 g of a sample): 40 g of lead oxide, 120 g of soda, 30 g of borax, 3 g of metallic iron, and 3 g of flour. The time of cupellation was 45 minutes at 905°C. The resulting gold beads were dissolved in aqua regia followed by AAS of solutions.

RESULTS AND DISCUSSION

Table 2 presents the results of sample "contamination" with gold. Adding a specified amount of Na[Au(CN)₂] was used to determine the correct isotherm of gold adsorption by the solid phase and organic carbon directly under cyanidation conditions, i.e. without the preliminary removal of carbonaceous matter and at a characteristic composition of salt in the slurry liquid phase. The isotherms are shown in Fig. 1 and Fig. 2.

Fig. 1 *a* indicates that the fraction of adsorbed gold was 0.1–0.4 g/t, 0.2–0.8 g/t,



Fig. 1. Isotherms of gold adsorption by the solid phase of cyanidation tailings (a) and natural organic carbon in cyanidation tailings (b)

Рис. 1. Изотермы сорбции золота твердой фазой хвостов цианирования (а) и природным органическим углеродом, входящим в их состав (b)

Byvaltsev A.V., Voiloshnikov G.I., Khmelnitskaya O.D. A procedure for preparing carbonaceous cyanidation tailings for gold... Бывальцев А.В., Войлошников Г.И., Хмельницкая О.Д. Методика подготовки углистосодержащих хвостов цианирования...

 Table 2. Results of experiments on carbonaceous cyanidation tailings "contamination" with sodium dicyanoaurate

 Таблица 2. Результаты опытов по «заражению» углистосодержащих хвостов цианирования дицианоауратом

 натрия

	Experimental			Design							
		Produced an e	Produced by filtration after an experiment			Adsorbed Au		Adde	ed Au		
Experiment	Added Au for	Au	Filter cake moisture content,% AAS	Au in cake	Au in cake (by Au loss e in liquid y phase and residual cake , moisture), g/t			by fire assay			
No. p	solid phase, g/t	concentration in liquid phase, mg/dm ³		by fire assay with AAS, g/t		g per 1 t of solid phase	g per 1 t of organic carbon	g/t	%		
Product 1											
1 (blank)	0	0	16.2	0.33	0.33	0	0	0	0		
2	0.33	0.015	17.5	0.54	0.63	0.30	88	0.09	31.1		
3	0.67	0.029	15.5	0.71	0.95	0.61	180	0.24	39.1		
4	1.00	0.054	18.9	0.93	1.23	0.89	262	0.30	33.3		
5	1.30	0.073	17.0	1.14	1.50	1.16	340	0.36	30.8		
	Product 2										
6 (blank)	0	0	14.3	0.56	0.56	0	0	0	0		
7	0.33	0.008	14.7	0.70	0.88	0.31	52	0.18	56.6		
8	0.67	0.023	18.4	0.90	1.19	0.62	104	0.29	45.5		
9	1.00	0.035	15.0	1.08	1.50	0.93	155	0.42	44.5		
10	1.30	0.058	15.5	1.37	1.76	1.19	198	0.39	32.3		
		_		Produ	ict 3						
11 (blank)	0	0	14.3	0.46	0.45	0	0	0	0		
12	0.33	0.037	15.5	0.62	0.71	0.26	49	0.09	35.3		
13	0.67	0.13	17.2	0.73	0.89	0.41	79	0.15	35.2		
14	1.00	0.18	16.9	0.94	1.13	0.64	123	0.18	26.8		
15	1.30	0.26	16.8	1.04	1.28	0.78	150	0.24	29.3		
				Produ	ict 4						
16 (blank)	0	0	19.1	2.75	2.78	0	0	0	0		
17	0.99	0.073	20.8	3.19	3.62	0.84	30	0.43	50.2		
18	2.01	0.11	17.6	3.74	4.57	1.79	64	0.83	45.9		
19	3.02	0.23	17.9	4.17	5.37	2.56	91	1.20	45.9		
20	3.88	0.31	18.3	5.13	6.09	3.26	116	0.96	28.8		

and 0.3–1.1 g/t at an Au concentration in the liquid phase of 0.01 mg/dm³ (typical for cyanidation tailings from existing mines), 0.03 mg/ dm³, and 0.05 mg/dm³, respectively. It should be noted that this fraction is quite significant and represents direct gold losses with cyanidation tailings caused by preg-robbing. In other words, this gold would have been recovered without preg-robbing.

As Fig. 1 *b* illustrates, the K factor of Freundlich isotherms (Au concentration (mg/ dm³) of the liquid phase vs. Au content (g/t) in carbonaceous matter) for organic carbon was 303–3037. K value for activated carbon typically varies from 3,000 to 30,000. It means that preg-robbing is only one order of magnitude lower for natural organic carbon than activated carbon. However, a larger quantity of natural carbonaceous matter in the feed (proportional to the process streams of activated carbon and natural carbonaceous matter in a cyanidation plant) resulted in significant adsorbed gold losses with cyanidation tailings.

From 30.8% to 56.5% of adsorbed gold (38.2% on average) was not determined in

2025;29(1):123-132

ISSN 2782-6341 (online)

"contaminated" samples by direct fire assay with AAS finish.

iPolytech Journal

Table 3 summarizes the results of the experiments on the high-temperature washing of adsorbed gold from cyanidation tailings to improve the accuracy of fire assay. The combined filtrates from washing contained 0.073–0.82 mg/dm³ of gold. It is

higher than the gold concentration in the initial liquid phase $(0.015-0.31 \text{ mg/dm}^3)$, even at the ~1.8-times dilution of solutions using washing water, and confirms the recovery of gold from carbonaceous matter. The washed solid phase contained less gold (0.34-3.04 g/t) than the solid phase without washing (0.54-5.13 g/t, see Table 2)

Table 3. Results of experiments on high-temperature washing of adsorbed gold from carbonaceous cyanidation tailings

Таблица 3. Результаты опытов по высокотемпературной отмывке сорбированного золота из углистосодержащих хвостов цианирования

			Experimental				Design			
	Added	Added before each Produced after each experiment by								
Experiment No.	Initial Au content in solid phase, g/t	Initial Au concentration in liquid phase, mg/dm ³	Combined filtrate volume, L	Final Au concentration in liquid phase, mg/dm ³	Au content in washed cake by fire assay with AAS, g/t	in initial solid phase by balance (washed cake + filtrate), g/t	Adde undete by wash washed solution g/t	ed Au rmined ning and cake and analysis		
		1	F	Product 1	<u> </u>					
21 (blank)	0.33	0	0.364	0	0.34	0.34	0	0		
22	0.63	0.015	0.359	0.073	0.34	0.60	0.03	10.6		
23	0.95	0.029	0.360	0.15	0.37	0.91	0.04	5.7		
24	1.23	0.054	0.352	0.21	0.41	1.12	0.11	12.3		
25	1.50	0.073	0.371	0.25	0.45	1.33	0.17	14.2		
Product 2										
26 (blank)	0.56	0	0.367	0	0.54	0.54	0	0		
27	0.88	0.008	0.353	0.071	0.58	0.84	0.03	10.5		
28	1.19	0.023	0.355	0.15	0.59	1.14	0.05	8.5		
29	1.50	0.035	0.371 0.20 0.62		1.37	0.12	13.0			
30	1.76	0.058	0.351	0.28	0.68	1.66	0.10	8.4		
Product 3										
31 (blank)	0.45	0	0.363	0	0.45	0.45	0	0		
32	0.71	0.037	0.363	0.079	0.45	0.69	0.02	7.0		
33	0.89	0.13	0.374	0.16	0.47	0.87	0.01	2.7		
34	1.13	0.18	0.370	0.22	0.51	1.05	0.07	10.7		
35	1.28	0.26	0.354	0.31	0.50	1.20	0.08	10.2		
			F	Product 4						
36 (blank)	2.76	0	0.363	0	2.80	2.80	0	0		
37	3.62	0.073	0.362	0.20	2.85	3.51	0.12	13.3		
38	4.57	0.11	0.350	0.44	2.90	4.39	0.18	10.0		
39	5.37	0.23	0.345	0.72	2.97	5.27	0.10	3.7		
40	6.09	0.31	0.373	0.82	3.04	5.82	0.27	8.1		

Byvaltsev A.V., Voiloshnikov G.I., Khmelnitskaya O.D. A procedure for preparing carbonaceous cyanidation tailings for gold... Бывальцев А.В., Войлошников Г.И., Хмельницкая О.Д. Методика подготовки углистосодержащих хвостов цианирования...



Fig. 2. Fraction of adsorbed gold undetermined by direct fire assay according to the standard procedure vs fraction of adsorbed gold analyzed using high-temperature washing

Рис. 2. Зависимость доли сорбированного золота, неопределяемого пробирным анализом, по стандартной методике и по методике с предварительной высокотемпературной отмывкой золота

as specified by the analysis data. However, the head gold content was higher in the initial solid phase without washing (0.60-5.82 g/t) by balance calculations than by direct analysis and closer to actual values determined by the amount of gold added in the experiments.

From 2.7% to 14.2% of gold (9.3% on average) was not determined in the "contaminated" samples by high-temperature washing followed by the analysis of solutions and washed cake as well as by balance calculations. It means that the proposed procedure reduced the fraction of such gold from 38.2% to 9.3% on average, or by 4.1 times.

Fig. 2 shows the fraction of adsorbed gold undetermined by direct fire assay with AAS finish and by the proposed procedure as a function of the amount of adsorbed gold in the solid phase.

CONCLUSIONS

Gold losses due to preg-robbing were estimated using the isotherms of gold adsorption by carbonaceous matter. The value of losses varied from 0.1 g/t to 1.1 g/t for the slurry liquid phase with a gold concentration of 0.01 mg/dm³ to 0.05 mg/dm³ which is typical for cyanidation tailings from existing mines. The data and the procedure can be used in the scientific and engineering studies of new gold-bearing materials.

The paper describes a new procedure for the analysis of gold in the liquid phase of carbonaceous cyanidation tailings. The advantages of the procedure include less measurement error compared to standard fire assay; the error was reduced from 38.2% to 9.2% during the experiments. The procedure can be used in existing mines for a more accurate estimation of actual gold losses with carbonaceous cyanidation tailings.

References

1. Schmitz P.A., Duyvesteyn S., Johnson W.P., Enloe L., McMullen J. Adsorption of aurocyanide complexes onto carbonaceous matter from preg-robbing goldstrike ore. *Hydrometallurgy*. 2001;61(2):121-135. https://doi.org/10.1016/ S0304-386X(01)00164-5.

2. Valdivieso-Bermeo P., Penaloza I., Moreno-Chavez J. Treatment for gold ores with high content of carbonaceous matter. *DYNA*. 2020;87(215):180-185. https://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.84282.

3. Adams M.D., Burger A.M. Characterization of carbonaceous preg-robbers and abraded carbon in gold residues. *Minerals Engineering*. 1998;11(10):919-927.

4. HammerschmidtJ., GüntnerJ., KerstiensB., CharitosA. Chapter24 – roastingofgoldoreinthecirculatingfluidized-bed technology. In: Adams M.D. (eds.). *Gold Ore Processing*. Amsterdam: Elsevier; 2016, p. 393-409. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00024-4.

5. Meretukov M.A. Gold and natural carbonaceous matter. Moscow: Ruda i metally; 2007, 528 p. (In Russ.).

6. Lodejshchikov V.V. Technology of gold and silver extraction from refractory ores. Irkutsk: Irgiredmet; 1999, 786 p. (In Russ.).

7. Miller J.D., Wan R.-Y., Díaz X. Preg-robbing gold ores. *Developments in Mineral Processing*. 2005;15:937-972. https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15038-8.

Polytech Journal

2025;29(1):123-132

ISSN 2782-6341 (online)

8. Dunne R., Buda K., Hill M., Staunton W., Wardell-Johnson G., Tjandrawan V. Assessment of options for economic processing of preg-robbing gold ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2012;121(4):217-223. https://doi.org/10.1179/1743285512Y.0000000019.

9. Ramli S.C.S., Osman R.M. Meeting the challenge of Penjom gold mine's geology in the recovery of fine gold in carbonaceous ores. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*. 2015;61:1-9. https://doi.org/10.7186/bgsm61201501.

10. Bogudlova A., Voiloshnikov G. Carbonaceous matter removal from gold-bearing ores. In: *Processing of the 27th IMPC*. 24 September 2014, Saniago. Saniago; 2014, chapt. 6, p. 129-137.

11. Aleksandrova T.N., Tsiplakov V.N., Romashev A.O., Semenikhin D.N. Removal of sorption-active carboniferous components from difficultly-treated gold sulfide ores and concentrates of the Mayskoye deposit. *Obogashcheniye rud*. 2015;4:3-7. (In Russ.). https://doi.org/10.17580/or.2015.04.01. EDN: ULVDMR.

12. Santiago R.C.C., Ladeira A.C.Q. Reduction of preg-robbing activity of carbonaceous gold ores with the utilization of surface blinding additives. *Minerals Engineering*. 2019;131:313-320. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.029.

13. Topychkanova E.I., Dementieva N.A., Mullov V.M., Chikin A.Yu. Optimization of low-grade refractory gold ore processing. *Transbaikal State University Journal.* 2024;30(3):89-100. (In Russ.). https://doi.org/10.2109/2227-9245-2024-30-3-89-100. EDN: NBSMRC.

14. Nekrasov I.Ya. Geochemistry, mineralogy and genesis of gold ore deposits. Moscow: Nauka; 1991, 302 p. (In Russ.).

15. Vysotskii I.V., Kovalev S.G. The problem of noble metal identification reliability. Geologicheskij sbornik. 2009;8:145-153. (In Russ.).

16. Litvinenko I.S., Tsymbalyuk N.V. Reliability of assessing large-tonnage quartz-sulfide gold deposits hosted by carbonaceous terrigene strata in north-eastern Russia. *Ores and Metals*. 2005;2:57-63. (In Russ.).

17. Juvonen R., Lakomaa T., Soikkeli L. Determination of gold and the platinum group elements in geological samples by ICP-MS after nickel sulphide fire assay: difficulties encountered with different types of geological samples. *Talanta*. 2002;58(3):595-603. (In Russ.). https://doi.org/10.1016/S0039-9140(02)00330-2.

18. Lobanov V.G., Vikulov V.I., Nabiullin F.M., Nacharov V.B., Filonov N.A., Semina I.N. Method of gold determination in ores and concentrates. Patent RF, no. 2434063; 2011. (In Russ.).

19. Byvaltsev A.V., Voiloshnikov G.I., Khmelnitskaya O.D., Bogorodskij E.V. Processing problems of carbonaceous preg-robbing gold ores. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2024;4:18-23. (In Russ.). EDN: PTZFQB.

20. Mullov V.M., Byval'cev A.V., Hmel'nickaya O.D.Method of gold extraction from cyanidation tailings of carbonaceous preg-robbing ores and concentrates. Patent RF, no. 2493277; 2013. (In Russ.).

Список источников

1. Schmitz P.A., Duyvesteyn S., Johnson W.P., Enloe L., McMullen J. Adsorption of aurocyanide complexes onto carbonae ceous matter from preg-robbing goldstrike ore // Hydrometallurgy. 2001. Vol. 61. Iss. 2. P. 121–135. https://doi.org/ 10.1016/S0304-386X(01)00164-5.

2. Valdivieso-Bermeo P., Penaloza I., Moreno-Chavez J. Treatment for gold ores with high content of carbonaceous matter // DYNA. 2020. Vol. 87. No. 215. P. 180–185. https://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.84282.

3. Adams M.D., Burger A.M. Characterization of carbonaceous preg-robbers and abraded carbon in gold residues // Minerals Engineering. 1998. Vol. 11. Iss. 10. P. 919–927.

4. Hammerschmidt J., Güntner J., Kerstiens B., Charitos A. Chapter 24 – roasting of gold ore in the circulating fluidized-bed technology // Gold Ore Processing / M.D. Adams. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016. P. 393–409. https:// doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00024-4.

5. Меретуков М.А. Золото и природное углистое вещество. М.: Руда и металлы, 2007. 528 с.

6. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. В 2-х т.; т. 2. Иркутск: Иргиредмет, 1999. 786 с.

7. Miller J.D., Wan R.-Y., Díaz X. Preg-robbing gold ores // Developments in Mineral Processing. 2005. Vol. 15. P. 937–972. https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15038-8.

8. Dunne R., Buda K., Hill M., Staunton W., Wardell-Johnson G., Tjandrawan V. Assessment of options for economic processing of preg-robbing gold ores // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2012. Vol. 121. Iss. 4. P. 217–223. https://doi.org/10.1179/1743285512Y.0000000019.

9. Ramli S.C.S., Osman R.M. Meeting the challenge of Penjom gold mine's geology in the recovery of fine gold in carbonaceous ores // Bulletin of the Geological Society of Malaysia. 2015. Vol. 61. P. 1–9. https://doi.org/ 10.7186/bgsm61201501.

10. Bogudlova A., Voiloshnikov G. Carbonaceous matter removal from gold-bearing ores // Processing of the 27th IMPC (Saniago, 24 September 2014). Saniago, 2014. Chapt. 6. P. 129–137.

11. Александрова Т.Н., Цыплаков В.Н., Ромашев А.О., Семенихин Д.Н. Удаление сорбционно-активных углеродистых веществ из упорных золотосульфидных руд и концентратов месторождения Майское // Обогащение руд. 2015. № 4. С. 3–7. https://doi.org/10.17580/or.2015.04.01. EDN: ULVDMR.

Byvaltsev A.V., Voiloshnikov G.I., Khmelnitskaya O.D. A procedure for preparing carbonaceous cyanidation tailings for gold... Бывальцев А.В., Войлошников Г.И., Хмельницкая О.Д. Методика подготовки углистосодержащих хвостов цианирования...

12. Santiago R.C.C., Ladeira A.C.Q. Reduction of preg-robbing activity of carbonaceous gold ores with the utilizal tion of surface blinding additives // Minerals Engineering. 2019. Vol. 131. P. 313–320. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.029.

13. Топычканова Е.И., Дементьева Н.А., Муллов В.М., Чикин А.Ю. Оптимизация технологии обогащения бедной технологически упорной золото-углеродсодержащей руды // Вестник Забайкальского государственного университета. 2024. Т. 30. № 3. С. 89–100. https://doi.org/10.2109/2227-9245-2024-30-3-89-100. EDN: NBSMRC.

14. Некрасов И.Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М.: Наука, 1991. 302 с.

15. Высоцкий И.В., Ковалев С.Г. Проблема достоверности определений благородных металлов // Геологический сборник. 2009. № 8. С. 145–153.

16. Литвиненко И.С., Цымбалюк Н.В. О достоверности оценки крупнообъемных кварцево-сульфидных месторождений золота в углеродисто-терригенных толщах на Северо-Востоке России // Руды и металлы. 2005. № 2. С. 57–63.

17. Juvonen R., Lakomaa T., Soikkeli L. Determination of gold and the platinum group elements in geological samples by ICP-MS after nickel sulphide fire assay: difficulties encountered with different types of geological samples // Talanta. 2002. Vol. 58. Iss. 3. P. 595–603. https://doi.org/10.1016/S0039-9140(02) 00330-2.

18. Пат. № 2434063, Российская Федерация, С1, С22В 11/02 G01N 33/20. Способ определения золота в рудах и концентратах / В.Г. Лобанов, В.И. Викулов, Ф.М. Набиуллин, В.Б. Начаров, Н.А. Филонов, И.Н. Семина; заявитель и патентообладатель Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Заявл.13.08.2010; опубл. 20.11.2011. Бюл. № 32.

19. Бывальцев А.В., Войлошников Г.И., Хмельницкая О.Д., Богородский Е.В. Проблемы переработки углистых сорбционно-активных золотых руд // Теория и технология металлургического производства. 2024. № 4. С. 18–23. EDN: PTZFQB.

20. Пат. № 2493277, Российская Федерация, С1, С22В 11/08 С22В 3/20. Способ извлечения золота из хвостов цианирования углистых сорбционно-активных руд и продуктов обогащения / В.М. Муллов, А.В. Бывальцев, О.Д. Хмельницкая; заявитель и патентообладатель Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов. Заявл. 01.02.2012; опубл. 20.09.2013. Бюл. № 26.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander V. Byvaltsev,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Hydrometallurgy Laboratory, Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, 38, Gagarin Blvd., Irkutsk 664025, Russia torrot_2008@mail.ru

Grigoriy I. Voiloshnikov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Deputy Director for Science,
Methodology and Innovations,
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds,
38, Gagarin Blvd., Irkutsk 664025, Russia
☑ greg@irgiredmet.ru

Olga D. Khmelnitskaya,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Hydrometallurgy Laboratory, Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, 38, Gagarin Blvd., Irkutsk 664025, Russia hod@irgiredmet.ru

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бывальцев Александр Владимирович, к т н

к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории гидрометаллургии, Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, 664025, г. Иркутск, Бульвар Гагарина, 38, Россия torrot_2008@mail.ru

Войлошников Григорий Иванович,

д.т.н., профессор,
заместитель генерального директора по
научно-методической и инновационной деятельности,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, г. Иркутск, Бульвар Гагарина, 38, Россия
☑ greg@irgiredmet.ru

Хмельницкая Ольга Давыдовна,

к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории гидрометаллургии, Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, 664025, г. Иркутск, Бульвар Гагарина, 38, Россия hod@irgiredmet.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

2025. T. 29. № 1. C. 123-132

2025;29(1):123-132

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 09.01.2025; approved after reviewing 18.02.2025; accepted for publication 28.02.2025.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 09.01.2025; г.; одобрена после рецензирования 18.02.2025 г.; принята к публикации 28.02.2025 г.

Конфликт интересов

ISSN 2782-4004 (print)

ISSN 2782-6341 (online)

- https://ipolytech.elpub.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Polytech Journal

2025. T. 29. № 1. 133-147 2025:29(1):133-147

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья УДК 66.083.3 EDN: IQOOPV DOI: 10.21285/1814-3520-2025-1-133-147



Гидротермальное взаимодействие сфалерита с растворами сульфата меди в присутствии лигносульфоната натрия

У.Р. Шарипова¹, М.А. Третьяк², К.А. Каримов³, Д.А. Рогожников⁴

¹⁻⁴Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Резюме. Цель - исследование эффективности введения поверхностно-активного вещества - лигносульфоната натрия – в процесс гидротермальной обработки сульфида цинка растворами сульфата меди. Растворы анализировали оптико-эмиссионным спектральным методом, кеки - на волновом рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL ADVANT'X. Обработка полученных данных проводилась с использованием пакетов прикладных программ: MS Excel, OriginPro и Statgraphics. Анализ размера частиц осуществлялся методом лазерной дифракции на приборе Bettersize ST. Изучена эффективность добавления лигносульфоната натрия на гидротермальное извлечение цинка из сфалерита. Установлено, что добавка данного поверхностно-активного вещества улучшает осаждение меди на поверхности сфалерита, что повышает уровень извлечения цинка в раствор. Было изучено влияние следующих параметров: количества лигносульфоната (0-1 г/дм³), температуры (180-220°С), концентраций серной кислоты (10-30 г/дм³) и меди (6-24 г/дм³); выявлены оптимальные условия для максимального извлечения цинка (55-71%) в продуктивный раствор и осаждения меди (45-83%) на кеке. Показано, что повышение температуры способствует увеличению скорости реакции и растворимости металлов. Выявлено, что изменение концентраций серной кислоты и меди влияет на равновесие реакций и эффективность извлечения цинка в раствор и осаждение меди из раствора. В ходе проведенных экспериментов установлены оптимальные параметры гидротермальной обработки: концентрация лигносульфоната – 0,25 г/дм³, температура – 220°С, концентрация серной кислоты – 10 г/дм³, начальная концентрация меди – 15 г/дм³. При данных параметрах за 120 мин в раствор извлекается 74% цинка и осаждается 83% меди на кеке. Таким образом, выявлено положительное влияние лигносульфоната натрия на процесс гидротермальной обработки сфалерита: введение данной добавки в количестве не более 0,25 г/дм³ интенсифицировало процесс, ускоряя обработку сфалерита в 1,5-2 раза.

Ключевые слова: автоклав, гидротермальная обработка, сфалерит, лигносульфонат натрия, медь

Финансирование. Исследование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда № 22-79-10290. Аналитические исследования выполнены при финансовой поддержке Госзадания РФ по Гранту № 075-03-2021-051/5 (FEUZ-2021-0017).

Для цитирования: Шарипова У.Р., Третьяк М.А., Каримов К.А., Рогожников Д.А. Гидротермальное взаимодействие сфалерита с растворами сульфата меди в присутствии лигносульфоната натрия // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 1. С. 133–147. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-133-147. EDN: IQOOPV.

METALLURGY

Original article

Hydrothermal interaction of sphalerite with copper sulfate solutions in the presence of sodium lignosulfonate

Uliana R. Sharipova¹, Maksim A. Tretiak^{2⊠}, Kirill A. Karimov³, Denis A. Rogozhnikov⁴

¹⁻⁴Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The present paper aims to study the efficiency of using sodium lignosulfonate surfactant for hydrothermal treatment of zinc sulfide with copper sulfate solutions. The solutions were analyzed by the optical emission spectral method; an ARL ADVANT'X wave X-ray fluorescence spectrometer was used to study cakes. MS Excel, OriginPro, and Statgraphics software packages were used for data processing. Particle size was determined using a Bettersize ST laser diffraction particle size analyzer. We have studied the effect of sodium lignosulfonate on the hydrothermal extraction of zinc from sphalerite. The addition of this surfactant enhances the precipitation of copper on the sphalerite surface, thus increasing the degree of zinc extraction into the solution. Effects of temperature (180–

[©] Шарипова У.Р., Третьяк М.А., Каримов К.А., Рогожников Д.А., 2025

2025. T. 29. № 1. C. 133-147

2025:29(1):133-147

ISSN 2782-4004 (print)

ISSN 2782-6341 (online)

220 °C) and concentration of lignosulfonate $(0-1 \text{ g/dm}^3)$, sulfuric acid $(10-30 \text{ g/dm}^3)$, and copper (6–24 g/dm³) has been studied; optimal conditions for the maximum zinc extraction of 55–71% into the pregnant solution and copper cake precipitation of 45–83% were identified. Elevated temperatures increase the reaction rate and solubility of metals. Changes in the concentrations of sulfuric acid and copper affect the equilibrium of reactions and the efficiency of copper precipitation and zinc extraction into the solution. The performed experiments have resulted in the optimal parameters of hydrothermal treatment: 0.25 g/dm³ lignosulfonate concentration, 220 °C temperature, 10 g/dm³ sulfuric acid concentration, and 15 g/dm³ initial copper concentration. For these parameters, 74% of zinc is extracted into the solution in 120 min and 83% of copper is deposited on the cake. Thus, the effect of sodium lignosulfonate on the hydrothermal treatment of sphalerite can be stated as positive: the concentration of this additive below 0.25 g/dm³ accelerates sphalerite treatment by 1.5–2 times.

Keywords: autoclave, hydrothermal treatment, sphalerite, sodium lignosulfonate, copper

Funding. The study was carried out under the Russian Science Foundation project No. 22-79-10290. Analytical studies were funded by the Grant No. 075-03-2021-051/5 (FEUZ-2021-0017) of the State Assignment of the Russian Federation.

For citation: Sharipova U.R., Tretiak M.A., Karimov K.A., Rogozhnikov D.A. Hydrothermal interaction of sphalerite with copper sulfate solutions in the presence of sodium lignosulfonate. *iPolytech Journal*. 2025;29(1):133-147. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-133-147. EDN: IQOOPV.

введение

Современные технологии переработки медно-цинковых руд, содержащих минералы халькопирит и сфалерит, представляют собой сложные и многоступенчатые процессы, направленные на селективное извлечение меди, цинка и других ценных компонентов [1]. В последние десятилетия наблюдается значительное усложнение состава добываемого медного и медно-цинкового сырья. Проблемы, возникающие при обогащении таких руд, часто связаны с взаимным вкраплением частиц основных минералов, что затрудняет их разделение. Например, халькопирит и сфалерит находятся в тесной связи, что требует применения более сложных методов разделения. К тому же наличие нежелательных примесей, таких как мышьяк, может значительно ухудшать качество конечного продукта и усложнять технологические процессы [2, 3]. Ученые по всему миру активно трудятся над разработкой новых технологий переработки, направленных на повышение эффективности извлечения металлов из сложных руд. Что включает в себя как усовершенствование традиционных методов флотации и гравитационного обогащения, так и внедрение инновационных подходов, таких как гидрометаллургия и биопереработка.

Пирометаллургические технологии, такие как рудная плавка и обжиг, по-прежнему занимают центральное место в металлургических схемах переработки, являясь основным способом получения металлов. Например, для переработки бедных руд с высоким содержанием примесей усложняется аппаратурная схема по причине введения новых операций, требующих значительных капитальных затрат (в частности, очистки пылеи газовыноса от нежелательных элементов – мышьяка, сурьмы и т.д., либо вторичной переработки шлаков), что в итоге может привести к понижению экономической эффективности пирометаллургических процессов [4, 5].

Среди гидрометаллургических технологий переработки медно-цинкового сырья в мировой промышленности одним из распространенных методов является автоклавное выщелачивание [6-9]. Одним из частных случаев автоклавного выщелачивания является гидротермальная обработка (ГТО), которая используется не только для обогащения медных концентратов, но и для удаления нежелательных примесей, таких как цинк, железо и мышьяк. Многие исследования по применению ГТО подтверждают эффективность взаимодействия медных концентратов с растворами сульфата меди [10-14], где преимущественно в раствор извлекаются Fe, Zn и другие металлы, а Cu из раствора осаждается на кеке, образуя вторичные сульфиды, тем самым обогащая кек по Си до 50-60%. В частности, взаимодействие сфалерита (ZnS) и пирита (FeS₂) с растворами CuSO₄ приводит к образованию вторичных сульфидов меди (CuS, Cu₂S) [11–16] по реакциями (1)-(4):

 $ZnS + CuSO_4 \rightarrow CuS + ZnSO_4$ (1)

$$5ZnS + 8CuSO_4 + 4H_2O \rightarrow Cu_2S + + 5ZnSO_4 + 4H_2SO_4$$
(2)

$$FeS_2 + CuSO_4 = CuS + FeSO_4 + S^0$$
(3)

$$4FeS_{2} + 7CuSO_{4} + 4H_{2}O = 7CuS + + 4FeSO_{4} + 4H_{2}SO_{4}$$
(4)

https://ipolytech.elpub.ru

Шарипова У.Р., Третьяк М.А., Каримов К.А. и др. Гидротермальное взаимодействие сфалерита с растворами сульфата... Sharipova U.R., Tretiak M.A., Karimov K.A., et al. I-V curves for detecting faults of operating photovoltaic modules...

Детальные кинетические исследования этого механизма проведены авторами работы [11], которые доказали двухступенчатое протекание реакций образования вторичных сульфидов меди на поверхности сфалерита с характерными диффузионными затруднениями.

Использование поверхностно-активных веществ в автоклавных процессах позволяет повысить показатели выщелачивания металлов (Cu, Fe, Zn, Ni) из сульфидных минералов (CuFeS₂, FeS₂, Fe₇S₈, ZnS, NiS) [17–20].

Введение в процесс отходов целлюлозно-бумажной промышленности, а именно технического лигносульфоната натрия (ЛСН) в качестве поверхностно-активного вещества, может способствовать интенсификации процесса ГТО как по извлечению цинка из концентрата в раствор в виде сульфата цинка (ZnSO₄), так и образованию вторичных сульфидов меди (CuS, Cu₂S) в кеке.

Целью данной работы является исследование эффективности введения поверхностно-активного вещества – лигносульфоната натрия – в процесс гидротермальной обработки сульфида цинка растворами сульфата меди.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования элементного состава исходного сырья и твердых продуктов гидротермальной обработки проводили на установке ARL ADVANT'X (Thermo Scientific, США) – метод рентгенофлуоресцентной спектрометрии. Химический состав исходной жидкой фазы и конечных растворов определяли методом атомно-эмиссионной спектрометрии на установке АЭС-ИСП, Ехрес-6500 (Китай). Распределение частиц по фракциям определяли лазерной дифракцией на установке Bettersize ST, Bettersize Instruments Ltd., Китай.

Объект исследований – минерал сфалерит Учалинского месторождения (Челябинская область, Россия). Минерал предварительно был измельчен до крупности 95% (-0,075 мм). Гранулометрический анализ представлен на рис. 1, дифракционное распределение частиц по фракциям приведено в табл. 1. Элементный анализ исходного минерала представлен в табл. 2.

В связи с ограниченной доступностью высокоочищенного минерала сульфида цинка (ZnS) в природных условиях, приоритетным направлением лабораторных исследований стало планирование экспериментов, направленных на оценку эффективности разработанного метода извлечения металлического цинка из рудных материалов и концентратов с применением ЛСН. Основное внимание уделялось оптимизации технологических параметров процесса, включая выбор реагентов, температурных режимов, времени обработки и других факторов, влияющих на степень извлечения целевого металла.



Рис. 1. Гранулометрический анализ пробы сфалерита **Fig. 1.** Granulometric analysis of the sphalerite sample

iPolytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 133-147

2025:29(1):133-147

ISSN 2782-6341 (online)

Таблица 1. Дифракционное распределение пробы сфалерита **Table 1.** Diffraction distribution of the sphalerite sample

d, мкм	0,00-	0,50-	1,00-	2,00-	5,00-	10,00-	20,00-	45,00-	75,00-	100,00-
	0,50	1,00	2,00	5,00	10,00	20,00	45,00	75,00	100,00	200,00
%	0,39	1,91	3,88	10,34	13,78	22,25	30,93	13,72	2,52	0,28

Таблица 2. Химический состав пробы сфалерита **Table 2.** Chemical composition of the sphalerite sample

Элемент	Zn	Fe	S	Прочее
Содержание, % масс.	56	1	38	5

Учитывая вышеуказанное ограничение имеющегося количества материала (ZnS), была выбрана лабораторная установка, позволяющая провести большее количество опытов для изучения широкого диапазона данных. Установка состоит из двух основных частей: горизонтальной печи и герметичных титановых реакторов. Печь (рис. 2 а) обеспечивает необходимый температурный режим, а реакторы (рис. 2 b) позволяют проводить эксперименты в условиях, исключающих доступ кислорода, что критично для процесса гидротермальной обработки. Реакторы имеют объем 50 см³ и состоят из стакана с крышкой на резьбе, а также фторопластовой прокладки с корзинкой для материала. Такая конструкция позволяет избежать контакта между материалом и раствором при вертикальной установке стакана в печи, что дает возможность контролировать начало реакции до достижения заданной температуры. Температура в реакторах автоматически регулируется блоком управления с точностью ±2°С и измеряется с помощью термопары.

Навеску минерала массой 0.5 г помещали во фторопластовую корзинку. Раствор с заданными концентрациями серной кислоты, сульфата меди (II) и лигносульфоната общим объемом 30 мл загружали в реакционный стакан. Перед началом эксперимента титановый реактор устанавливали на вал горизонтальной печи в вертикальном положении, печь нагревали до заданной температуры и после ее достижения запускали вращение вала, тем самым смешивая навеску с раствором и фиксируя начало эксперимента. По завершении эксперимента реактор остужали в объеме холодной воды до комнатной температуры, полученную пульпу фильтровали самотеком. Из полученных продуктов (кека, фильтрата) формировали пробы для химического анализа на содержание цинка, меди.





Рис. 2. Лабораторная установка: а – горизонтальная печь; b – титановый реактор (автоклав)

Fig. 2. Laboratory setup: a – horizontal furnace; b – titanium reactor (autoclave)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках исследования были изучены основные параметры, влияющие на выщелачивание цинка из ZnS и осаждение меди в виде вторичных сульфидов меди (CuS, Cu₂S)

Шарипова У.Р., Третьяк М.А., Каримов К.А. и др. Гидротермальное взаимодействие сфалерита с растворами сульфата... Sharipova U.R., Tretiak M.A., Karimov K.A., et al. I-V curves for detecting faults of operating photovoltaic modules...

на кек. В частности, эксперименты проводились при температуре в диапазоне от 180 до 220°С, с варьируемой исходной концентрацией серной кислоты от 10 до 30 г/дм³ и свободных ионов меди от 6 до 24 г/дм³. Время реакции также изменялось от 1 до 120 мин.

Рис. З иллюстрирует зависимость извлечения цинка и осаждения меди от продолжительности процесса при различной исходной концентрации ЛСН (0–1 г/дм³) в растворе.

Влияние добавки ЛСН на показатели гидротермальной обработки сфалерита оказывается весьма значительным. Так, наличие АСН в растворе при процессе ГТО существенно ускоряет процесс гидротермальной обработки сфалерита в первые 40 мин благодаря своим поверхностно-активным свойствам. При концентрации лигносульфоната 0,25 г/дм³ извлечение цинка за 120 мин составляет около 64%, а осаждение меди – более 65%. Важно отметить, что добавление АСН более 0,25-1 г/дм³ оказывало негативное влияние на извлечение цинка и осаждение меди. Это связано с деструктивными изменениями АСН при температурах выше 130°С, что подтверждается исследованиями других авторов, фиксировавших сниже-



Рис. 3. Зависимость степени извлечения цинка (а) и осаждения меди (b) от продолжительности при разных концентрациях лигносульфоната натрия (t = 200°C, $[H_2SO_4]_0$ = 20 г/дм³, $[Cu]_0$ = 15 г/дм³)

Fig. 3. Degree of zinc recovery (a) and copper precipitation (b) vs experiment duration at different concentrations of sodium lignosulfonate (t = 200 °C, [H_2 SO₄]₀ = 20 g/dm³, [Cu]₀ = 15 g/dm³)

ISSN 2782-6341 (online)

ние эффективности ЛСН при повышении его концентрации в условиях среднетемпературного автоклавного выщелачивания [21]. На основании полученных данных, для дальнейших расчетов была выбрана оптимальная концентрация ЛСН – 0,25 г/дм³. Результаты следующих экспериментов демонстрируют зависимость извлечения цинка и осаждения меди от продолжительности при различной температуре (180–220°С), что представлено на рис. 4.

С увеличением температуры наблюдается рост извлечения цинка (рис. 4 *a*, *c*) и осаждения меди (рис. 4 *b*, *c*) в первые 60 мин. Это подчеркивает важность температурного контроля в процессе выщелачивания, так как более высокие температуры способствуют активизации реакций и увеличению скорости извлечения металлов. При температуре 180°С и использовании ЛСН через 40 мин в раствор удалось извлечь 37,9% Zn. В то же время без добавления ЛСН при той же температуре за тот же интервал времени извлечение Zn составило лишь 16,8%. Более того, при температуре 220°С за 120 мин с использованием ЛСН наблюдается повышение осаждения до 81% Cu, в отличие от 70% без применения ЛСН.

Несмотря на возможность дальнейшего увеличения показателей извлечения цинка и осаждения меди при еще более высоких температурах, в нашем эксперименте существует риск повреждения лабораторного оборудования при превышении 220°С. Поэтому для последующих расчетов мы фиксируем температуру на уровне 220°С.



https://ipolytech.elpub.ru



Рис. 4. Влияние продолжительности на извлечение цинка (a, c) и осаждение меди (b, d) при отсутствии (a, b) и наличии лигносульфоната натрия (c, d) при различной температуре ($[H_2SO_4]_0 = 20 \ r/Am^3$, $[Cu]_0 = 15 \ r/Am^3$, $[\Lambda CH]_0 = 0,25 \ r/Am^3$) **Fig. 4.** Experiment duration vs degree of zinc recovery (a, c) and copper precipitation (b, d) in the absence (a, b) and presence of sodium lignosulfonate (c, d) at different temperature ($[H_2SO_4]_0 = 20 \ g/dm^3$, $[Cu]_0 = 15 \ g/dm^3$, $[SLS]_0 = 0.25 \ g/dm^3$)

На рис. 5 представлена зависимость извлечения цинка из сфалерита в раствор и осаждения меди на кек от продолжительности эксперимента при различной исходной концентрации серной кислоты (10–30 г/дм³).

Увеличение начальной концентрации серной кислоты оказывает негативное влияние на степень извлечения цинка, а также на осаждение меди в условиях отсутствия лигносульфоната, что соответствует выводам исследователей, представленным в работе [21]. В то же время добавление ЛСН в систему вызывает эффект обратной зависимости влияния серной кислоты на извлечение металла и осаждение меди на сфалерит. В течение 60 мин гидротермальной обработки сфалерита при концентрациях 10, 20 и 30 г/дм³ извлекаются, соответственно, 62, 66 и 71% цинка. При этом также происходит осаждение меди, достигающее 79, 82 и 86% в тех же условиях. Это свидетельствует о том, что увеличение концентрации кислоты положительно сказывается на извлечении цинка, однако разница в показателях не является значительной. Для дальнейших экспериментов была выбрана начальная концентрация серной кислоты, равная 10 г/дм³, что по-

2025. T. 29. № 1. C. 133-147

2025;29(1):133-147 ×⁶⁰ Извлечение Zn, % 20 4 5. – 30 г/дм³ •— 20 г/дм³ – 10 г/дм³ . 80 Продолжительность, мин а Осаждение Си, % · · - 30 г/дм³ - 20 г/дм³ **---** 10 г/дм³ Продолжительность, мин b Извлечение Zn, % 00 20 30 30 30





Рис. 5. Влияние продолжительности эксперимента на извлечение цинка (a, c) и осаждение меди (b, d) при отсутствии (a, b) и наличии лигносульфоната натрия (c, d) при различной исходной концентрации серной кислоты (t = 220°C, [Cu]₀ = 15 г/дм^3 ; [ЛСН]₀ = 0,25 г/дм³)

Fig. 5. Experiment duration vs zinc recovery (a, c) and copper precipitation (b, d) in the absence (a, b) and presence of sodium lignosulfonate (c, d) at different initial concentration of sulfuric acid (t = 220 °C, [Cu]₀ = 15 g/dm^3 ; [SLS]₀ = 0.25 g/dm^3)

зволяет более точно оценить влияние других факторов на процесс.

На графике, представленном на рис. 6, отображено влияние продолжительности эксперимента на извлечение цинка из сфалерита, а также на степень осаждения меди на кеке при различной исходной концентрации меди (6-24 г/дм³).

Интересен тот факт, что увеличение концентрации ионов меди не приводит к значительному изменению скорости и степени извлечения цинка, как в условиях отсутствия, так и в присутствии ЛСН. Однако стоит отметить, что добавление ПАВ в систему значительно улучшает извлечение цинка. Например, при концентрации меди 24 г/дм³ и времени реакции 60 мин извлечение цинка достигает 72% в присутствии ПАВ, в то время как в отсутствие ПАВ этот показатель составляет всего 57%. Это подчеркивает важность использования ПАВ для ускорения извлечения металлов из минералов. Более того, в условиях присутствия ПАВ процесс извлечения цинка достигает стабильного уровня уже



iPolytech Journal

2025. T. 29. № 1. C. 133-147

ISSN 2782-6341 (online)



Рис. 6. Влияние продолжительности эксперимента на извлечение цинка (a, c) и осаждение меди (b, d) при отсутствии (a, b) и наличии лигносульфоната натрия (c, d) при различной исходной концентрации меди ($[H_2SO_4]_0 = 10 \ r/Am^3$; t = 220°C; $[\Lambda CH]_0 = 0,25 \ r/Am^3$)

Fig. 6. Experiment duration vs zinc recovery (a, c) and copper precipitation (b, d) in the absence (a, b) and presence of sodium lignosulfonate (c, d) at different initial copper concentration ($[H_2SO_4]_0 = 10 \text{ g/dm}^3$; t = 220°C; [SLS]_0 = 0.25 g/dm³)

Шарипова У.Р., Третьяк М.А., Каримов К.А. и др. Гидротермальное взаимодействие сфалерита с растворами сульфата... Sharipova U.R., Tretiak M.A., Karimov K.A., et al. I-V curves for detecting faults of operating photovoltaic modules...

через 40 мин, тогда как в отсутствие ПАВ это значение достигается только после 120 мин обработки. Данные результаты подтверждают гипотезу о том, что ПАВ способствуют интенсификации извлечения металлов, вероятно, за счет снижения поверхностного натяжения и улучшения взаимодействия между реагентами. Что касается осаждения меди, то здесь влияние ПАВ не столь заметно при низкой начальной концентрации меди в 6 г/дм³. Это может указывать на то, что при более низких концентрациях меди другие факторы, такие как температура и, как следствие, давление паров воды, могут оказывать более значительное влияние на процесс осаждения. Однако, если рассмотреть результаты осаждения Си при 24 г/дм³ исходной концентрации ионов меди (II), то в условиях присутствия ЛСН за 120 мин показатель осаждения составляет 64%, что значительно выше, чем 51% при отсутствии ЛСН. Это может быть связано с тем, что наличие ЛСН в растворе способствует, вероятно, образованию более стабильных комплексов с медью, что в свою очередь облегчает процесс осаждения. Таким образом, можно сделать вывод, что использование ЛСН не только способствует повышению степени извлечения цинка, но и влияет на эффективность осаждения меди. Также стоит отметить, что гидротермальная обработка сфалерита является сложным процессом, в котором выбор подходящих реагентов и условий оптимизации процессов могут влиять друг на друга. Например, температура процесса и давление паров воды, а также время реакции могут существенно изменять эффективность извлечения. Важно учитывать, что каждая из этих переменных может быть оптимизирована для достижения наилучших результатов.

Дальнейшие исследования в этой области могут привести к более эффективным технологиям переработки цинковых и медно-цинковых концентратов, что будет способствовать более широкому использованию сложных по составу минерально-сырьевых ресурсов в металлургической промышленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что добавление 0,25 г/дм³ лигносульфоната натрия значительно улучшает эффективность гидротермальной обработки сфалерита, уменьшая продолжительность процесса примерно в 1,5-2 раза. Этот способ имеет важное значение для горной и металлургической отраслей, поскольку позволяет более эффективно извлекать ценные металлы из руд. Однако стоит отметить, что при дальнейшем увеличении концентрации поверхностно-активного вещества в процессе ГТО сульфида цинка показатели выщелачивания цинка из этого соединения - основы сфалерита – начинают снижаться. Это может быть связано с тем, что высокие концентрации добавки могут вызывать нежелательные эффекты, такие как агрегация частиц или изменение свойств раствора, что, в свою очередь, негативно сказывается на процессе извлечения цинка. Также были установлены оптимальные параметры для гидротермальной обработки сфалерита с использованием растворов сульфата меди в присутствии ЛСН. В ходе экспериментов было определено, что при концентрации серной кислоты, равной 10 г/дм³, температуре 220°С и начальной концентрации меди, равной 15 г/дм³, при добавлении 0,25 г/дм³ ЛСН можно достичь максимального извлечения цинка - до 74% за 120 мин обработки. В то же время в процессе осаждается 83% меди, что также является высоким результатом. Таким образом, результаты исследований открывают новые горизонты для повышения эффективности извлечения металлов из сульфидных руд и концентратов, что может привести к более устойчивым и экономически выгодным технологиям в металлургической промышленности. Важно продолжать изучение влияния использования различных поверхностно-активных добавок на показатели автоклавных процессов, в частности ГТО, и изменяющихся условий на процессы выщелачивания, чтобы выявить оптимальные параметры данной обработки сульфатом меди при разработке технологии переработки сфалерит- и пиритсодержащих руд и концентратов.

Список источников

^{1.} Шумская Е.Н., Поперечникова О.Ю., Тихонов Н.О. Разработка технологии обогащения труднообогатимой колчеданной полиметаллической руды Корбалихинского месторождения // Горный журнал. 2014. № 11. С. 78–83. http://doi.org/10.17580/gzh.2016.11.08. EDN: SZEWFP.
iPolytech Journal

2025;29(1):133-147

2. Абишев Д., Еремин Ю. Обогащение тонковкрапленных руд – приоритетное направление горно-металлургического комплекса // Промышленность Казахстана. 2000. № 10. С. 96–99.

3. Чантурия В.А. Инновационные технологии комплексной и глубокой переработки минерального сырья сложного вещественного состава // Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения): матер. Междунар. конф. (г. Апатиты, 21–26 сентября 2020 г.). Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2020. С. 3–4. EDN: MABCBV.

4. Орлов А.К., Коновалов Г.В., Бодуэн А.Я. Пирометаллургическая селекция медно-цинковых материалов // Записки Горного института. 2011. Т. 192. С. 65–68. http://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433. EDN: ROWETD.

5. Булатов К.В., Жуков В.П. Технологические возможности металлургической переработки промпродуктов обогащения полиметаллических руд и обеднения шлаков медеплавильного производства в агрегате «Победа» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 421–433. http://doi.org/ 10.21285/1814-3520-2020-2-421-433. EDN: OUSGWL.

6. Шнеерсон Я.М., Набойченко С.С. Тенденции развития автоклавной гидрометаллургии цветных металлов // Цветные металлы. 2011. № 3. С. 15–20. EDN: NFAQJB.

7. Лапин А.Ю., Шнеерсон Я.М. История создания и освоения автоклавно-гидрометаллургической технологии по переработке никель-пирротиновых концентратов // Цветные металлы. 2020. № 9. С. 57–64. EDN: QAWUXI.

8. Кочин В.А., Набойченко С.С., Лебедь А.Б., Мальцев Г.И. Автоклавно-флотационная схема переработки Си – Pb – Zn-концентратов // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 196. EDN: RXUOZP.

9. Kritskii A., Karimov K., Naboichenko S. Pressure leaching of chalcopyrite concentrate: iron removal from leaching residues // Solid State Phenomena. 2020. Vol. 299. P. 1052–1057. http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.1052. EDN: TRLLKB.

10. Kritskii A.A., Naboichenko S.S., Karimov K.A., Vivek A., Lundström M. Hydrothermal pretreatment of chalcopyrite concentrate with copper sulfate solution // Hydrometallurgy. 2020. Vol. 195. P. 105478. http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105359. EDN: JBCCPP.

11. Kritskii A., Celep O., Yazici E., Deveci H., Naboichenko S. Hydrothermal treatment of sphalerite and pyrite particles with CuSO₄ solution // Minerals Engineering. 2022. Vol. 180. P. 107507. http://doi.org/10.1016/j. mineng.2022.107507.

12. Kritskii A., Fuentes G., Deveci H. A critical review of hydrothermal treatment of sulfide minerals with Cu(II) solution in H_2SO_4 media // Hydrometallurgy. 2024. Vol. 231. Iss. 12. P. 106413. http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106413.

13. Fomenko I.V., Pleshkov M.A., Shneerson Y.M., Ospanov E.A., Shakalov A.A., Naboichenko S.S. Low-grade copper concentrate purification and enrichment by complex pressure oxidation-hydrothermal alteration technology // 10th Conference proceedings of COM + COPPER (Vancouver, 18–21 August 2019). Montreal: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2019. 13 p. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/347949233_LOW-GRADE_COPPER_CONCENTRATE_PURIFICATION_AND_ENRICHMENT_BY_COMPLEX_PRESSURE_OXIDATION_- HYDROTHERMAL_ALTERATION_TECHNOLOGY (дата обращения: 28.09.2024).

14. Ковязин А.А., Тимофеев К.Л., Мальцев Г.И., Краюхин С.А. Гидротермальное осаждение меди из растворов выщелачивания металлургических пылей // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 547–561. https://doi.org/ 10.21285/1814-3520-2024-3-547-561. EDN: UYMDXG.

15. Kritskii A., Naboichenko S. Hydrothermal treatment of arsenopyrite particles with CuSO₄ Solution // Materials. 2021. Vol. 14. Iss. 23. P. 7472. http://doi.org/10.3390/MA14237472. EDN: ORSDOU.

16. Viñals J., Fuentes G., Hernández M.C., Herreros O. Transformation of sphalerite particles into copper sulfide particles by hydrothermal treatment with Cu(II) ions // Hydrometallurgy. 2004. Vol. 75. Iss. 1-4. P. 177–187. http://doi.org/ 10.1016/j.hydromet.2004.07.005.

17. Луговицкая Т.Н., Колмачихина Э.Б., Набойченко С.С. К вопросу о применении поверхностно-активных веществ для интенсификации процессов высокотемпературного автоклавного выщелачивания сульфидных минералов // Современные технологии производства цветных металлов: матер. Междунар. науч. конф., посвящ. 80-летию С.С. Набойченко (г. Екатеринбург, 24–25 марта 2022 г.). Екатеринбург: Уральский федеральный унтим. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2022. С. 59–64. EDN: UXXVLK.

18. Нафталь М.Н. Применение комбинированного поверхностно-активного вещества – перспективное направление совершенствования технологии автоклавно-окислительного выщелачивания никель-пирротиновых концентратов // Цветные металлы. 2011. № 10. С. 47–53. EDN: OIIZQX.

19. Нафталь М.Н., Выдыш А.В., Сухобаевский И.Ю., Бельский А.Н., Асанова И.И. Воздействие лигносульфонатов на поведение элементной серы при автоклавном выщелачивании никель-пирротиновых концентратов // Цветные металлы. 2009. № 1. С. 25–33. EDN: JVXGCG.

20. Хазиева Э.Б., Свиридов В.В., Набойченко С.С., Меньщиков В.А. Влияние поверхностно-активных веществ на состояние серы при автоклавном выщелачивании цинковых концентратов // Цветные металлы. 2017. № 2. С. 46–50. http://doi.org/10.17580/tsm.2017.02.07. EDN: YGSDNZ.

21. Колмачихина Э.Б., Луговицкая Т.Н., Третьяк М.А., Наумов К.Д. Кинетические исследования влияния поверхностно-активных веществ на показатели автоклавного выщелачивания сульфидных цинковых концентратов // VIII Информационная школа молодого ученого: докл. Всерос. междисциплинарной молодеж. науч. конф. с междуШарипова У.Р., Третьяк М.А., Каримов К.А. и др. Гидротермальное взаимодействие сфалерита с растворами сульфата... Sharipova U.R., Tretiak M.A., Karimov K.A., et al. I-V curves for detecting faults of operating photovoltaic modules...

нар. участием (г. Екатеринбург, 21–24 сентября 2020 г.). Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2020. С. 32–41. http://doi.org/ 10.32460/ishmu-2020-8-0004. EDN: RGPSRN.

References

1. Shumskaya E.N., Poperechnikova O.Yu., Tikhonov N.O. Development of technology of concentration of complex pyrite polymetallic ore of Korbalikhinskoe deposit. Gornyi Zhurnal. 2014;11:78-83. (In Russ.). http://doi.org/ 10.17580/gzh.2016.11.08. EDN: SZEWFP.

2. Abishev D., Eremin Yu. Concentration of finely disseminated ores as a priority direction of the mining and metallurgical complex. *Industry of Kazakhstan*. 2000;10:96-99. (In Russ.).

3. Chanturiya V.A. Innovative technologies for complex and deep processing of mineral raw materials with complex material composition. In: *Innovacionnye* processy kompleksnoj pererabotki prirodnogo i tekhnogennogo mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya) = Innovative processes of complex processing of natural and technogenic mineral raw materials (Plaksin readings): Proceedings of the International Conference 21–26 September 2020, Apatity. Apatity: Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 2020, p. 3-4. (In Russ.). EDN: MABCBV.

4. Orlov A.K., Konovalov G.V., Boduen A.J. Pyrometallurgical selection of copper-zinc materials. *Journal of Mining Institute*. 2011;192:65-68. (In Russ.). http://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433. EDN: ROWETD.

5. Bulatov K.V., Zhukov V.P. Technological capabilities for metallurgical processing of industrial products in polymetallic ore preparation and copper smelting slag depletion in the Pobeda smelting unit. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(2):421-433. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433. EDN: OUSGWL.

6. Shneerson Ya.M., Naboichenko S.S. Tendencies of non-ferrous metals autoclave hydrometallurgy development. *Tsvetnye metally*. 2011;3:15-20. (In Russ.). EDN: NFAQJB.

7. Lapin A.Yu., Shneerson Ya.M. Creation and development history of autoclave-hydrometallurgical technology for processing nickel-pyrrhotite concentrates. *Tsvetnye metally*. 2020;9:57-64. (In Russ.). EDN: QAWUXI.

8. Kochin V.A., Naboichenko S.S., Lebed A.B., Maltcev G.I. Pressure leaching–flotation method processing Cu – Pb – Zn concentrates. *Modern problems of science and education*. 2013;2:196. (In Russ.). EDN: RXU0ZP.

9. Kritskii A., Karimov K., Naboichenko S. Pressure leaching of chalcopyrite concentrate: iron removal from leaching residues. *Solid State Phenomena*. 2020;299:1052-1057. http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.1052. EDN: TRLLKB.

10. Kritskii A.A., Naboichenko S.S., Karimov K.A., Vivek A., Lundström M. Hydrothermal pretreatment of chalcopyrite concentrate with copper sulfate solution. *Hydrometallurgy*. 2020;195:105478. http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105359. EDN: JBCCPP.

11. Kritskii A., Celep O., Yazici E., Deveci H., Naboichenko S. Hydrothermal treatment of sphalerite and pyrite particles with CuSO₄ solution. *Minerals Engineering*. 2022;180:107507. http://doi.org/10.1016/j. mineng.2022.107507.

12. Kritskii A., Fuentes G., Deveci H. A critical review of hydrothermal treatment of sulfide minerals with Cu(II) solution in H₂SO₄ media. *Hydrometallurgy*. 2024;231:106413. http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106413. 13. Fomenko I.V., Pleshkov M.A., Shneerson Y.M., Ospanov E.A., Shakalov A.A., Naboichenko S.S. Low-grade copper concentrate purification and enrichment by complex pressure oxidation-hydrothermal alteration technology. In: *10th Conference proceedings of COM + COPPER*. 18–21 August 2019, Vancouver. Montreal: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum; 2019, 13 p. Available from: https://www.researchgate.net/publication/347949233_LOW-GRADE_COPPER_CONCENTRATE_PURIFICATION_AND_ENRICHMENT_BY_COMPLEX_PRESSURE_OXIDATION_-HYDROTHERMAL_ALTERATION_TECHNOLOGY [Accessed 28th September 2024].

14. Kovyazin A.A., Timofeev K.L., Maltsev G.I., Krayukhin S.A. Hydrothermal precipitation of copper from leaching solutions of metallurgical dusts. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):547-561. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-547-561. EDN: UYMDXG.

15. Kritskii A., Naboichenko S. Hydrothermal treatment of arsenopyrite particles with CuSO₄ Solution. *Materials*. 2021;14(23):7472. http://doi.org/10.3390/MA14237472. EDN: ORSDOU.

16. Viñals J., Fuentes G., Hernández M.C., Herreros O. Transformation of sphalerite particles into copper sulfide particles by hydrothermal treatment with Cu(II) ions. *Hydrometallurgy*. 2004;75(1-4):177-187. http://doi.org/ 10.1016/j.hydromet.2004.07.005.

17. Lugovitskaya T.N., Kolmachikhina E.B., Nabojchenko S.S. On surfactant application to intensify high-temperature pressure leaching of sulfide minerals. In: Sovremennye tekhnologii proizvodstva cvetnyh metallov: materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 80-letiyu S.S. Naboichenko = Modern production technologies of non-ferrous metals: Proceedings of International scientific conference dedicated to the 80th anniversary of S.S. Naboichenko. 24–25 March 2022, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Federal University named after the President of Russia B.N. Yeltsin; 2022, p. 59-64. (In Russ.). EDN: UXXVLK.

 Naftal M.N. Usage of combined surface-active materials is prospective direction for improvement of technology of autoclave-oxidation leaching of nickel-pyrrhotine concentrates. *Tsvetnye metally*. 2011;10:47-53. (In Russ.). EDN: OIIZQX.
 Naftal M.N., Vydysh A.V., Sukhobaevsky I.Yu., Belsky A.N., Asanova I.I. Effect of lignosulphonates on behavior of elemental sulphur in the technology of autoclave hydrometallurgy of nickel-pyrrhotite concentrates. Tsvetnye metally. 2009;1:25-33. (In Russ.). EDN: JVXGCG.

2025. T. 29. № 1. C. 133-147

2025;29(1):133-147

ISSN 2782-4004 (print)

ISSN 2782-6341 (online)

20. Khazieva E.B., Sviridov V.V., Naboichenko S.S., Menshchikov V.A. Influence of surface-active substances on sulfur state during the autoclave leaching of zinc concentrates. *Tsvetnye metally*. 2017;2:46-50. http://doi.org/10.17580/tsm.2017.02.07. (In Russ.). EDN: YGSDNZ.

21. Kolmachikhina E.B., Lugovitskaya T.N., Tretiak M.A., Naumov K.D. Kinetic studies of surfactant influence on zinc sulfide concentrate pressure leaching performance. In: *VIII Informatsionnaya shkola molodogo uchenogo: doklady Vserossiiskoi mezhdisciplinarnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem =* 8th *Information School of Young Scientists: reports of All-Russian interdisciplinary youth scientific conference with international participation.* 21–24 September 2020, Ekaterinburg. Ekaterinburg: UMC UPI; 2020, p. 32-41. (In Russ.). http://doi.org/10.32460/ishmu-2020-8-0004. EDN: RGPSRN.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шарипова Ульяна Рамильевна,

инженер-исследователь

научной лаборатории перспективных технологий комплексной переработки минерального и техногенного сырья цветных и черных металлов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия ursharipova@urfu.ru

Третьяк Максим Алексеевич,

к.т.н.,

младший научный сотрудник научной лабораторией перспективных технологий комплексной переработки минерального и техногенного сырья цветных и черных металлов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия ⊠ m.a.tretiak@urfu.ru http://orcid.org/0000-0001-8405-8100

Каримов Кирилл Ахтямович,

к.т.н.,

старший научный сотрудник научной лаборатории перспективных технологий комплексной переработки минерального и техногенного сырья цветных и черных металлов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия kirill_karimov07@mail.ru http://orcid.org/0000-0003-1415-4484

Рогожников Денис Александрович,

д.т.н., доцент,
заведующий научной лабораторией
перспективных технологий
комплексной переработки минерального
и техногенного сырья цветных и черных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
darogozhnikov@urfu.ru
http://orcid.org/0000-0002-5940-040X

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Uliana R. Sharipova,

Research Engineer, Scientific Laboratory of Advanced Technologies for Complex Processing of Mineral and Technogenic Raw Materials of Non-Ferrous and Ferrous Metals, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia ursharipova@urfu.ru

Maksim A. Tretiak,

Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher, Scientific Laboratory of Advanced Technologies for Complex Processing of Mineral and Technogenic Raw Materials of Non-Ferrous and Ferrous Metals, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia m.a.tretiak@urfu.ru http://orcid.org/0000-0001-8405-8100

Kirill A. Karimov,

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Scientific Laboratory of Advanced Technologies for Complex Processing of Mineral and Technogenic Raw Materials of Non-Ferrous and Ferrous Metals, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia kirill_karimov07@mail.ru http://orcid.org/0000-0003-1415-4484

Denis A. Rogozhnikov,

Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Laboratory, Scientific Laboratory of Advanced Technologies for Complex Processing of Mineral and Technogenic Raw Materials of Non-Ferrous and Ferrous Metals, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia darogozhnikov@urfu.ru http://orcid.org/0000-0002-5940-040X

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Шарипова У.Р., Третьяк М.А., Каримов К.А. и др. Гидротермальное взаимодействие сфалерита с растворами сульфата... Sharipova U.R., Tretiak M.A., Karimov K.A., et al. I-V curves for detecting faults of operating photovoltaic modules...

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.12.2024 г.; одобрена после рецензирования 12.01.2025 г.; принята к публикации 30.01.2025 г.

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

The authors declare no conflict of interests.

Information about the article

The article was submitted 06.12.2024; approved after reviewing 12.01.2025; accepted for publication 30.01.2025.

Conflict of interests

iPolytech Journal

Том 29, Nº 1. 2025 / Vol. 29, No.1. 2025

Уважаемые коллеги!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации

I. Рукопись статьи направляется в редакцию через online форму (после предварительной регистрации авторов). Рекомендуемый объем статьи не менее 20 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение от аффилированной организации о возможности публикаций в открытой печати.

2. Лицензионный договор.

3. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (5–7); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон, е-mail и ORCID (вся информация предоставляется одним файлом).

3. Статья должна иметь личную подпись автора; на статьях адъюнктов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

II. Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail должны быть также представлены по электронной почте: pgp@istu.edu в виде файла с расширением *.DOC – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;

2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;

3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются курсивом; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;

4) рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Схемы, графики выполняются во встроенной программе MS Word или в MS Excel, с приложением файлов (представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах);

5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

«iPolytech Journal» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть «iPolytech Journal» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть наук, (Категория К1) в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «Киберленин-ка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНИТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «iPolytech Journal», реферируются и рецензируются. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.

Телефон: (3952) 40-57-56 – Привалова Галина Петровна, ответственный секретарь. Факс: (3952) 405-100, e-mail: pgp@istu.edu.

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

iPolytech Journal

Том 29, № 1. 2025 / Vol. 29, No. 1. 2025

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 31.03.2025 г. Формат 60х90/8. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 18,75. Тираж 500 экз. Номер по реестру 11/3н.

Издание распространяется бесплатно

