ISSN 1814-3520 (print)
ISSN 2500-1590 (online)

Том 24 № 1
2020

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

12+

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2020

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2020

Том 24 № 1

2020

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 24 № 1

2020

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета

Журнал основан в 1997 г.
Периодичность издания –
6 раз в год
Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство ПИ № ФС77-62813 от 18 августа 2015 г.
Учредитель Иркутский национальный исследовательский технический университет

Подписной индекс в каталоге Агентства ЗАО ИД «Экономическая газета» «Объединенный каталог. Пресса России. Газеты и журналы» - 41476 (ОК + ЭК)
Адрес Агентства ЗАО ИД «Экономическая газета»:
(499) 152-09-89; izdatcat@ideg.ru

Адрес учредителя, издателя:
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Адрес редакции:
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. Д-215, e-mail: pgp@istu.edu

Редакционная коллегия

КОРНЯКОВ М.В, доктор технических наук, ректор Иркутского национального исследовательского технического университета, главный редактор (г. Иркутск, Россия)
НЕМЧИНОВА Н.В., доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора (г. Иркутск, Россия)
БАЖИН В.Ю., доктор технических наук, декан факультета переработки минерального сырья Санкт- Петербургского горного университета (г. Санкт - Петербург, Россия)
БАЛИКОВ С.В., доктор технических наук, главный научный сотрудник Иркутского научно-исследовательского института благородных и редких металлов и алмазов (г. Иркутск, Россия)
БЛЮМЕНШТЕЙН В.Ю., доктор технических наук, профессор Кузбасского государственного технического университета (г. Кемерово, Россия)
БОЛДЫРЕВ А.И., доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия)
БОРОВИКОВ Ю.С., доктор технических наук, и.о. ректора Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого (г. Великий Новгород, Россия)
ВОРОПАЙ Н.И., член-корреспондент РАН, научный руководитель Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
ГАЛЕВСКИЙ Г.В., доктор технических наук, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов и химической технологии Сибирского государственного индустриального университета (г. Новокузнецк, Россия)
ДАМБИЕВ Ц.Ц., доктор технических наук, профессор Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления (г. Улан-Удэ, Россия)
ЗАЙДЕС С.А., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета(г. Иркутск, Россия)
ЗАКАРЮКИН В.П., доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия)
КАРПЕНКО Е.И., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой лаборатории плазменно-энергетических процессов и технологий Института физического материаловедения СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)
КЛЕР А.М., доктор технических наук, главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
КОЛОСОК И.Н., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
КРЮКОВ А.В., доктор технических наук, академик Российской академии транспорта, член-корр. АН ВШ РФ и Российской инженерной академии, заслуженный энергетик Республики Бурятия, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия)
КУРБАЦКИЙ В.Г., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
МАМЯЧЕНКОВ С.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Уральского Федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)
МАТЛИН М.М., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой деталей машин и подъемно-транспортных устройств Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, Россия)
НОВИЦКИЙ Н.Н., доктор технических наук, главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
ОГАР П.М., доктор технических наук, профессор Братского государственного университета (г. Братск, Россия)
ПАЗДЕРИН А.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электрических систем Уральского Федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)
ПАНТЕЛЕЕВ В.И., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрических комплексов и систем Сибирского федерального университета (г. Красноярск, Россия)
РАХИМЯНОВ Х.М., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения Новосибирского государственного технического университета (г. Новосибирск, Россия)
СЕНДЕРОВ С.М., доктор технических наук, заместитель директора Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
СТЕННИКОВ В.А., доктор технических наук, профессор, директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
СТЫЧИНСКИ З.А., профессор Университета Отто-фон-Герике. (г. Магдебург, Германия)
ТАНУТРОВ И.Н., доктор технических наук, главный научный сотрудник Института металлургии УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)
ТЮРИНА Э.А., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
ФЕДЯЕВ А.А., доктор технических наук, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Братского государственного университета (г. Братск, Россия)
ФИШОВ А.Г., доктор технических наук, профессор Новосибирского государственного технического университета (г. Новосибирск, Россия)
ШОЛЬТЕС Бертхольт, директор Института металловедения Кассельского университета (г. Кассель, Германия)

© ФГБОУ ВО “Иркутский национальный исследовательский технический университет”, **2020**

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 24 No. 1

2020

Publishers of Irkutsk National Research Technical University

The Journal was founded in 1997
Frequency of publication – 6 times a year
The journal is registered with the Federal Agency for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Media (Roskomnadzor).
Certificate of registration
№ ПИ № ФС77-62813
of 18 August, 2015.
Founder: Irkutsk National Research Technical University

Subscription index in the catalog of JSC «Economic Newspaper» Publishing House
“The united catalog. Russian press. Newspapers and journals"-
41476 (OK + EC)
Address of JSC «Economic Newspaper» Publishing House: (499) 152-09-89;
izdatcat@ideg.ru

Address of the founder, publisher:
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074

Address of the editorial office:
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074,
D-215, e-mail: pgp@istu.edu

Editorial board

KORNYAKOV M.V., Dr. Sci. (Eng.), Rector of Irkutsk National Research Technical University, Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)
NEMCHINOVA N.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)
BAZHIN V.Yu., Dr. Sci. (Eng.), Dean of the Mineral Resources Processing Faculty, Saint Petersburg Mining University (Saint Petersburg, Russia)
BALIKOV S.V., Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of Irkutsk Scientific Research Institute of Noble and Rare Metals and Diamonds (Irkutsk, Russia)
BLUMENSTEIN V.Yu., Dr. Sci. (Eng.), Professor of Kuzbass State Technical University (Kemerovo, Russia)
BOLDYREV A.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)
BOROVIKOV Yu.S., Dr. Sci. (Eng.), Acting Rector of Novgorod State University n.a. Yaroslav-the-Wise (Veliky Novgorod, Russia)
VOROPAI N.I., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
GALEVSKY G.V., Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Nonferrous Metallurgy and Chemical Technology of the Siberian State Industrial University (Novokuznetsk, Russia)
DAMBIEV Ts.TS., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the East Siberian State University of Technology and Management (Ulan-Ude, Russia)
ZAIDES S.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Machine Building Technologies and Materials, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
ZAKARYUKIN V.P., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Transport Electricity of Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)
KARPENKO E.I.., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of the Laboratory of Plasma Energy Processes and Technologies of the Institute of Physical Materials Science of the SB RAS (Ulan-Ude, Russia
KLER A.M., Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
KOLOSOK I.N., Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
KRYUKOV A.V., Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Transport, Corresponding member of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation and the Russian Academy of Engineering, Honored Power Engineer of the Republic of Buryatia, Professor of the Department of Transport Electric Power Industry of Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)
KURBATSKY V.G., Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
MAMYACHENKOV S.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals of the Ural Federal University n.a. the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)
MATLIN M.M., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Machine Parts and Hoisting-and-Transport Devices, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)
NOVITSKY N.N., Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
OGAR P.M., Dr. Sci. (Eng.), Professor of Bratsk State University (Bratsk, Russia)
PAZDERIN A.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automated Electric Systems of the Ural Federal University n.a. the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)
PANTELEEV V.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Electrical Complexes and Systems of the Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)
RAKHIMYANOV Kh.M., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia)
SENDEROV S.M., Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
STENNIKOV V.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
STYCZYNSKI S.A., Professor of the Otto-von-Guericke University (Magdeburg, Germany)
TANUTROV I.N., Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg, Russia)
TYURINA E.A., Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
FEDYAEV A.A., Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Industrial Heat and Power Engineering of Bratsk State University (Bratsk, Russia)
FISHOV A.G., Dr. Sci. (Eng.), Professor Новосибирского государственного технического университета (Novosibirsk, Russia)
SCHOLTES B., Director of the Institute of Metal Science of the University of Kassel (Kassel, Germany)

© FSBEIHE “Irkutsk National Research Technical University”, 2020

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 24 № 1

2020

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание 4

Машиностроение и машиноведение

Балла О.М. Проектирование концевых фрез, оснащенных неперетачиваемыми пластинками из твердых сплавов и быстрорежущих сталей для обработки деталей из труднообрабатываемых материалов..... 8

Карлина Ю.И., Журавлев Д.А. Удаление заусенцев с малогабаритных высокоточных деталей для сверхвысокочастотной электроники..... 25

Левко В.А., Савин Д.И., Литовка О.В. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости заготовок из сплавов порошкового молибдена..... 36

Нгуен Ван Чьеу. Повышение твердости поверхностного слоя малоуглеродистой стали за счет плазменной обработки модифицирующей обмазки..... 52

Поляков П.А., Тагиев Р.С., Федотов Е.С., Полякова Е.А., Москаленко М.Б. Разработка тепловой модели тормозного диска фрикционного узла..... 64

Солер Я.И., Шустов А.И. Выбор оптимальной характеристики высокопористых нитридборовых кругов при плоском шлифовании вспомогательного производства самолетостроительных предприятий..... 77

Энергетика

Андреев М.В., Суворов А.А., Киевец А.В., Рудник В.Е. Использование математической модели для настройки цифровой дифференциальной защиты трансформатора..... 85

Ахмедов С.Б., Климов П.Л. Влияние распределенной генерации на базе возобновляемых источников энергии с использованием силовой электроники на резонанс на гармонических частотах..... 97

Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен Ван Хуан. Координация настроек автоматических регуляторов паротурбинной установки распределенной генерации..... 112

Иванова А.Е., Захаров В.Е., Петрова Т.Н. Анализ субсидирования тепловой энергии в Арктической зоне Республики Саха (Якутия)..... 123

Кузькина Я.И., Голуб И.И. Идентификация фаз подключения интеллектуальных счетчиков в низковольтной распределительной сети..... 135

Курбацкий В.Г., Шакиров В.А. Методическое и программное обеспечение для оценки ветроэнергетического потенциала северо-востока России..... 145

Обухов С.Г., Ибрагим А. Анализ режимов и выбор параметров преобразователя напряжения и контроллера максимальной мощности автономной фотоэлектрической станции..... 164

Разживин И.А., Рубан Н.Ю., Аскаров А.Б., Уфа Р.А. Разработка программно-технических средств моделирования ветроэнергетической установки 4 типа..... 183

Металлургия и материаловедение

Балахонов Д.И. Исследование сплава системы W-C, полученного методом локального высокоэнергетического воздействия из шеелитового концентрата..... 195

Исагулов А.З., Макаев Т.С., Квон Св.С., Куликов В.Ю., Щербакова Е.П. Исследование влияния режима обработки стали ферросиликоалюминием на ее металлургические свойства..... 208

Кирос Кабасканго В.Э., Бажин В.Ю. Управление параметрами газовых горелок отражательных печей горения при плавлении никельсодержащего сырья..... 220

Халифа А.А.Е., Утков В.А., Бричкин В.Н. Влияние красного шлама на предотвращение полиморфизма двухкальциевого силиката и саморазрушения агломерата..... 231

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 24 No. 1

2020

CONTENTS

Contents 5

Mechanical Engineering and Machine Science

- **Balla O.M.** Design of end mills equipped with disposable carbide and high speed steel inserts for machining of parts made of hard-to-process materials 8
- **Karlina Y.I., Zhuravlev D.A.** Deburring of small high-precision parts for ultra high frequency electronics 25
- **Levko V.A, Savin D.I., Litovka O.V.** Powder molybdenum alloy workpieces contact interactions under abrasive flow machining by high viscosity media 36
- **Nguyen Van Trieu** Improving low-carbon steel surface layer hardness through modifying coating plasma treatment 52
- **Polyakov P.A., Tagiev R.S., Fedotov E.S., Polyakova E.A., Moskalenko M.B.** Developing thermal model of friction assembly brake disc 64
- **Soler Ya.I, Shustov A.I.** Search for optimal characteristic of high porosity nitride boron wheels under aircraft factory auxiliary process flat grinding 77

Power Engineering

- **Andreev M.V., Suvorov A.A., Kievets A.V., Rudnik V.E.** Digital transformer differential protection setting using its mathematical models 85
- **Akhmedov S.B., Klimov P.L.** Effect of renewable energy-based distributed generation with power invertors on resonance at harmonic frequencies 97
- **Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguyen Van Huan.** Coordination of DG steam turbine plant automatic controller settings 112
- **Ivanova A.E., Zakharov V.E., Petrova T.N.** Analysis of thermal energy subsidizing in the Sakha Republic (Yakutia) Arctic zone 123
- **Kuzkina Ya.I., Golub I.I.** Identification of smart meter connection phases in low-voltage distribution network 135
- **Kurbatsky V.G., Shakirov V.A.** Methodology and software for assessing the wind energy potential of the northeast of Russia 145
- **Obukhov S.G., Ibrahim A.** Mode analysis and parameter selection of voltage converter and maximum power controller of a stand-alone photovoltaic station 164
- **Razzhivin I.A., Ruban N.Yu., Askarov A.B., Ufa R.A.** Development of hardware and software simulation tools for 4 type wind turbine modeling 183

Metallurgy and Materials Science

- **Balakhonov D.I.** Study of W-C system alloy obtained from scheelite concentrate by local high-energy impact method 195
- **Issagulov A.Z., Makaev T.S., Kvon S.S., Kulikov V.Yu., Shchernakova E.P.** Studying influence of steel treatment mode using ferrosilicoaluminum on its metallurgical properties 208
- **Quiroz Cabascango V.E., Bazhin V.Yu.** Control of reverberatory furnace gas burner parameters under nickel-containing raw material melting 220
- **Khalifa A.A., Utkov V.A., Brichkin V.N.** Red mud effect on dicalcium silicate polymorphism and sinter self-destruction prevention 231

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2020

Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию очередной выпуск научного журнала «Вестник Иркутского государственного технического университета».

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 Минобразования России.

«Вестник ИрГТУ» 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.

«Вестник ИрГТУ» реферируется и рецензируется.

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- Машиностроение и машиноведение
- Энергетика
- Металлургия и материаловедение

Редколлегия

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Publishers of Irkutsk National Research Technical University, 2020

Dear Readers!

We would like to bring to your attention the next issue of the scientific journal “Proceedings of Irkutsk State Technical University”. 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.

Proceedings of Irkutsk State Technical University (“Vestnik IrGTU”) is included in the “UlrichsPeriodicals Directory”, 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 “Proceedings of Irkutsk State Technical University” is abstracted and reviewed.

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

- Mechanical Engineering and Machine Science
- Power Engineering
- Metallurgy and Materials Science

Editorial Board

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.9.02
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-8-24

Проектирование концевых фрез, оснащенных неперетачиваемыми пластинками из твердых сплавов и быстрорежущих сталей для обработки деталей из труднообрабатываемых материалов

© О.М. Балла
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – повышение эффективности механической обработки деталей из труднообрабатываемых материалов, таких как сплавы на основе титана и высокопрочные нержавеющие стали типа ВНС, путем применения специальных конструкций концевых фрез, оснащенных неперетачиваемыми пластинками твердого сплава или быстрорежущих сталей. В работе был применен теоретически обоснованный и экспериментально подтвержденный способ повышения работоспособности специальных конструкций концевых фрез путем управления формой поперечного сечения среза, что позволяет снизить нагрузки на технологическую систему и тем самым обеспечить интенсификацию режимов обработки. Наиболее просто управление формой поперечного сечения среза реализуется применением переменных схем резания. Предложенная схема расположения неперетачиваемых пластинок из твердых сплавов и быстрорежущих сталей на одной вспомогательной технологической винтовой линии позволила формализовать проектирование специальных концевых фрез и тем самым обеспечить интенсификацию режимов фрезерования на стадии их проектирования. Это позволило разработать методику проектирования специальных конструкций концевых фрез с неперетачиваемыми пластинками твердых сплавов для фрезерования труднообрабатываемых материалов. Применение расчетных методов исключило влияние субъективных факторов инженерно-технических работников на качество проектирования инструмента и снизило трудоемкость конструкторских работ. Создание специальных концевых фрез с неперетачиваемыми пластинками твердых сплавов и быстрорежущих сталей для чернового фрезерования заготовок деталей из труднообрабатываемых материалов обеспечило интенсификацию съема металла от 2 до 5 раз, значительное снижение расхода инструментальных материалов по сравнению с монолитными конструкциями инструмента и многократное использование корпусов инструмента.

***Ключевые слова*:** концевые фрезы, неперетачиваемые пластинки, твердые сплавы, быстрорежущие стали, труднообрабатываемые материалы, инструментальные материалы

Информация о статье: Дата поступления 29 августа 2019 г.; дата принятия к печати 19 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Балла О.М. Проектирование концевых фрез, оснащенных неперетачиваемыми пластинками из твердых сплавов и быстрорежущих сталей для обработки деталей из труднообрабатываемых материалов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 1. С. 8–24. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-8-24

Design of end mills equipped with disposable carbide and high speed steel inserts for machining of parts made of hard-to-process materials

Oleg M. Balla
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Abstract: The purpose of the work is to increase the machining efficiency of parts made of hard-to-process materials such as titanium-based alloys and high-strength stainless steels of the Cr-Ni-Si type by using special designs of end mills equipped with disposable carbide or high speed steel inserts. The work applies a theoretically justified and experimentally proved method of improving performance of special end mill designs by controlling the shape of the cut cross-section, which reduces the loads on the technological system and thereby intensifies processing modes. The simplest way to control the shape of cut cross-section is to use alternating cutting patterns. The proposed arrangement pattern of disposable carbide or high speed steel inserts located on one auxiliary technological helix allows to formalize the designing of special end mills and intensify milling modes at the stage of their design. This makes it possible to develop a designing

methodology for special designs of end mills with disposable carbide inserts for milling hard-to-process materials. The use of calculation methods eliminates the influence of subjective factors of engineering stuff on the quality of tool design and reduces the complexity of design works. Creation of special end mills with disposable carbide or high speed steel inserts for rough milling of parts made of hard-to-process materials has intensified metal removal from 2 to 5 times, ensured a significant reduction in the consumption of tool materials in comparison with monolithic tool structures, and provided a multi-fold use of tool bodies as well.

Keywords: end mills, disposable inserts, carbide alloys, high speed steels, hard-to-process materials, tool materials

Information about the article: Received August 29, 2019; accepted for publication December 19, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Balla OM. Design of end mills equipped with disposable carbide and high speed steel inserts for machining of parts made of hard-to-process materials. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1): 8–24. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-8-24

1. ВВЕДЕНИЕ

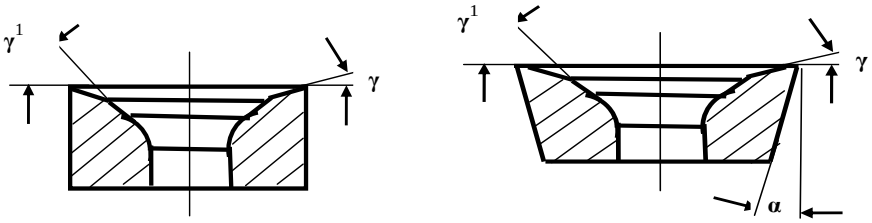
Для ряда отраслей машиностроения процесс фрезерования является превалирующим по трудоемкости механической обработки. При этом следует учитывать, что более 70% трудоемкости приходится на концевое фрезерование [1–3]. С учетом широкого применения деталей из труднообрабатываемых материалов повышение эффективности концевого фрезерования деталей является актуальной задачей. В данной работе рассмотрены вопросы интенсификации режимов фрезерования на стадии проектирования специальных конструкций концевых фрез, оснащенных неперетачиваемыми пластинками из твердых сплавов или высоколегированных быстрорежущих сталей для черновой обработки деталей из труднообрабатываемых материалов. Также фрезы могут быть оснащены пластинками из дисперсионно-твердеющих инструментальных сплавов.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Известно, что влияние толщины среза на силы резания значительно меньше, чем ширины среза [4]. В работах [5–7] теоретически и экспериментально обоснована возможность управления силами резания за счет изменения формы поперечного сечения среза при сохранении объема удаляемого материала и, как следствие, повышения эффективности процесса чернового фрезерования деталей из труднообрабатываемых материалов. Это особенно важно в условиях производства изделий из заготовок с низкими значениями коэффициентов использования материалов (КИМ). Низкие значения КИМ характерны для штамповок из труднообрабатываемых материалов и тем более для плит и поковок. Изменение типа заготовок в наукоемких отраслях промышленности возможно только по разрешению служб главного конструктора предприятия и даже в ряде случаев предприятий разработчиков изделий. Кроме того, низкие значения КИМ заготовок из высокопрочных материалов вызывают значительный расход инструмента. Его снижение (инструмента) наряду с применением перспективных инструментальных материалов может быть обеспечено за счет – фрез с неперетачиваемыми пластинками [8, 9], а повышение эффективности чернового фрезерования – применением в их конструкциях переменных схем резания[1] [6, 10].

Для реализации переменных схем резания в конструкциях сборных концевых фрез целесообразно применять неперетачиваемые пластинки цилиндрической или усеченной конической формы, рис. 1.

[1]Баранчиков В.И., Боровский Г.В., Гречишников В.А., Иванов Ю.И., Кирсанов Г.Н., Кравченко Б.А. [и др.]. Справочник конструктора-инструментальщика. М.: Машиностроение, 1994. 560 с.



a *b*

Рис. 1. Неперетачиваемые пластины твердого сплава или быстрорежущей стали цилиндрической (a) и усеченной конической (b) форм с укороченной передней поверхностью: γ – передний угол; γ^1 – передний угол укороченной передней поверхности; α – задний угол на пластинке
Fig. 1. Disposable carbide or high speed inserts of cylindrical (a) and truncated conical (b) shapes with the shortened front surface γ – front angle; γ^1 – front angle of the shortened front surface; α – rear angle on the insert

Применение неперетачиваемых пластин, имеющих в плане цилиндрическую форму, позволяет реализовать схему резания, приведенную на рис. 2.

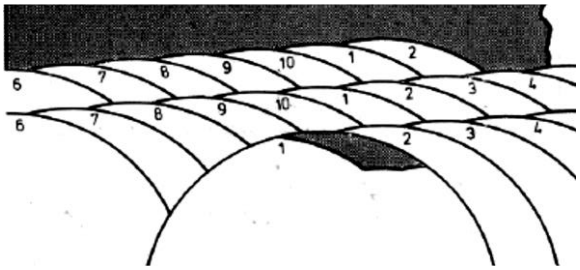


Рис. 2. Схема срезания элементарных стружек неперетачиваемыми пластинками
Fig. 2. Diagram of cutting elementary chips by disposable inserts

Цифрами на рис. 2 показана последовательность срезания стружек пластинками смежных зубьев. По сравнению с призматическими пластинками, расположенными в шахматном порядке, изображенными на рис. 3, цилиндрические обеспечивают лучшее соотношение активной длины режущих кромок к толщине среза и тем самым обеспечивают большее снижение нагрузок на технологическую систему [6].

Если для призматических пластин их смещение в смежных рядах зубьев является величиной постоянной и зависит только от конструктивных параметров пластин, а именно – от длины режущей кромки и радиуса сопряжения ее граней (рис. 4), то смещение пластин в смежных рядах зубьев будет равно

$$m = L - 2r - (0{,}5 - 1). \qquad (1)$$



Рис. 3. Рабочая часть фрезы с шахматным расположением неперетачиваемых призматических пластин
Fig. 3. Working part of a mill with chess arrangement of disposable prismatic inserts

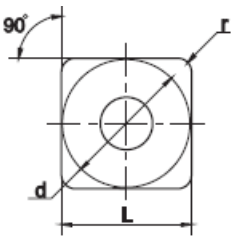


Рис. 4. Конструктивные параметры призматических пластин, влияющие на их смещение в смежных рядах зубьев: L – длина режущей кромки пластины; r – радиус сопряжения граней пластинки; d – диаметр вписанной окружности
Fig. 4. Design parameters of prismatic plates influencing their displacement in adjacent rows of teeth: L –length of the plate cutting edge; r – radius of plate faces conjugation; d – diameter of the inscribed circle

ISSN 1814-3520

Это обеспечит снижение составляющих сил фрезерования вследствие уменьшения активной длины режущих кромок при их расположении в шахматном порядке. При этом будет иметь место увеличение толщины среза, приходящееся на каждый режущий элемент зуба. В целом снижение сил резания при сравнении фрез с шахматным расположением пластин с длиннокромочными, как показали расчеты [4] и экспериментальные работы, находится в пределах 14–20%.

Применение пластин с цилиндрической режущей кромкой позволяет значительно уменьшить смещение режущих кромок. В зависимости от диаметров фрез, его значение может быть в пределах от 0,5 $D_{пл}$ (для фрез небольших размеров) до значений менее 1 мм. Влияние смещения режущих кромок в смежных рядах пластин на силы резания при фрезеровании приведено на рис. 5.

Экспериментальные работы были выполнены на станке модели ФП17МН, специально изготовленными фрезами диаметром 60 мм, со смещением режущих кромок в смежных рядах зубьев, соответственно, от 5 до 1 мм при фрезеровании титанового сплава ВТ20 при скорости резания V = 19,5 м/мин, подаче на зуб фрезы Sz = 0,1 мм/зуб и ширине фрезерования B = 50 мм, в качестве смазочноохлаждающей жидкости применяли 8% раствор эмульсола Р3 СОЖ8. При выполнении работ было установлено, что уменьшение смещения режущих кромок пластин в смежных рядах зубьев с 5 до 1 мм обеспечивает снижение сил фрезерования практически в 3 раза. С учетом полученных результатов на базе применения теории «винтовых поверхностей» [11, 12], автором была разработана математическая модель формирования переменной схемы резания с расположением режущих элементов на одной вспомогательной винтовой линии, обеспечивающая автоматическое формирование смежных рядов зубьев. В зависимости от сочетания направлений вспомогательной винтовой линии, углов наклона зубьев, образованных дискретными режущими кромками, и наклона самих режущих кромок (пластин) было выделено 8 типовых схем расположения пластин на вспомогательной винтовой линии.

Экспериментальные работы были выполнены на станке ФП17МН, специально изготовленными фрезами диаметром 60 мм, со смещением режущих кромок в смежных рядах зубьев.

Схемы расположения пластин на вспомогательной винтовой поверхности приведены на рис. 6–9.

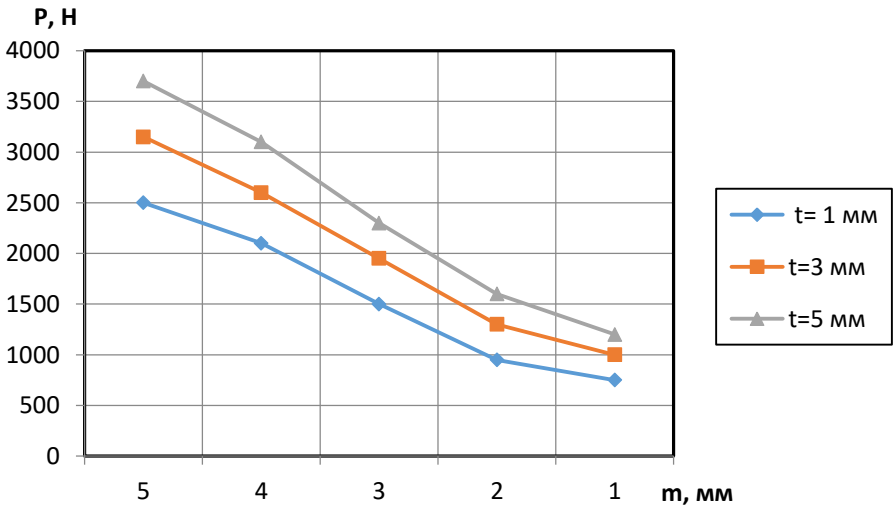
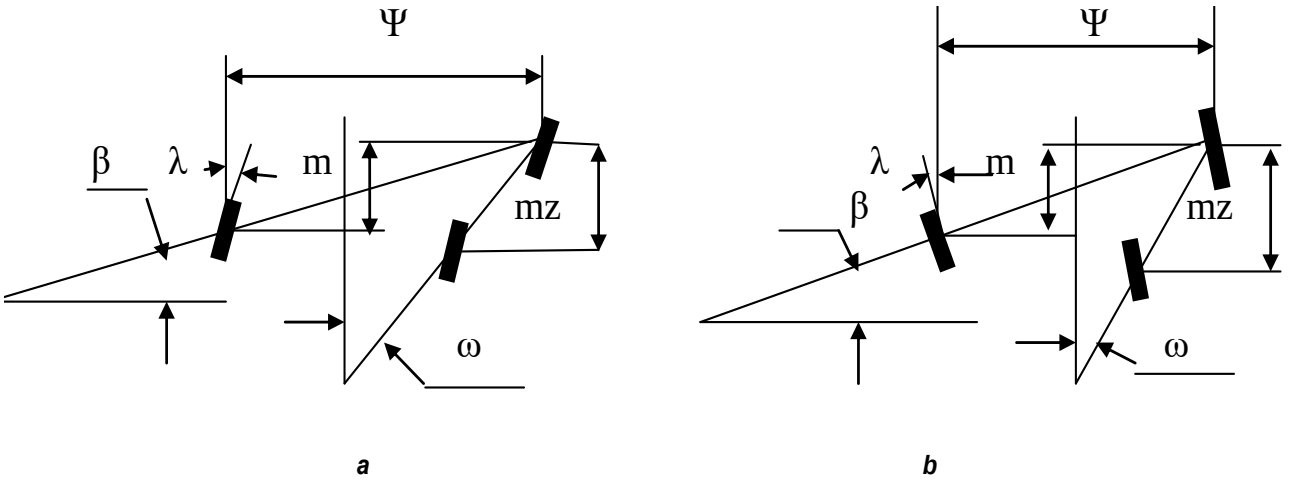


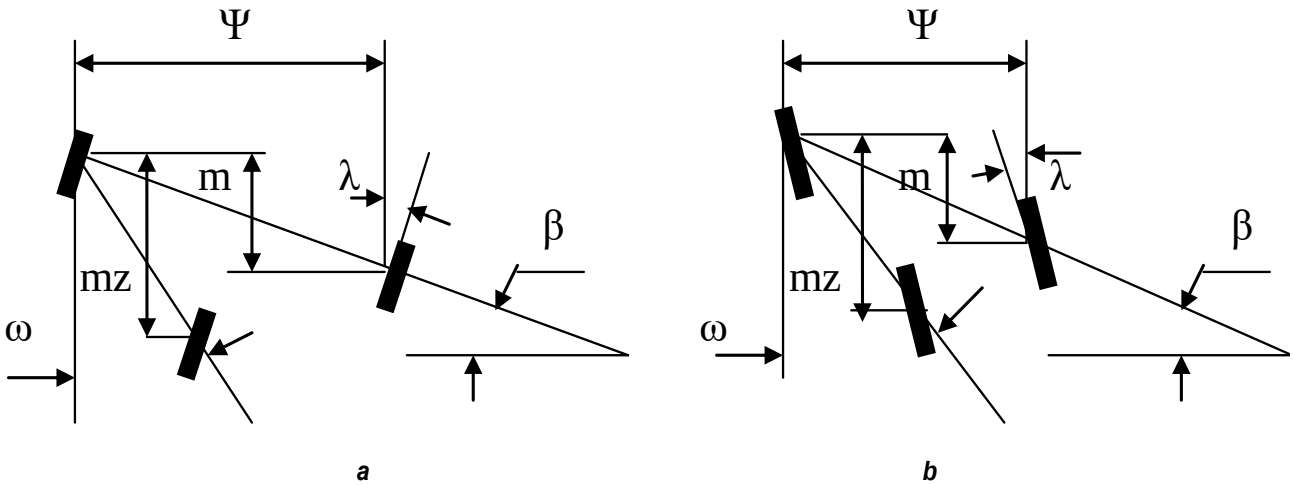
Рис. 5. Влияние смещения режущих кромок (m) в смежных рядах пластин на силы резания (P) при фрезеровании
Fig. 5. Effect of cutting edge displacement (m) in adjacent rows of plates on cutting forces (P) at milling



a *b*

Рис. 6. Расположение пластин на вспомогательной винтовой линии правого направления (β) на фрезах с правым направлением винтовой линии зуба (ω), но противоположными углами наклона режущих кромок пластин (λ); Ψ – угол поворота корпуса фрезы для обработки смежных гнезд под пластинки; m – смещение пластин относительно друг друга на вспомогательной винтовой линии в смежных рядах зубьев; z – число рядов зубьев (расположение пластин); a – угол наклона режущей кромки пластины (λ) совпадает с направлением винтовой линии зуба; b – угол наклона режущей кромки пластины (λ) противоположен направлению винтовой линии зуба

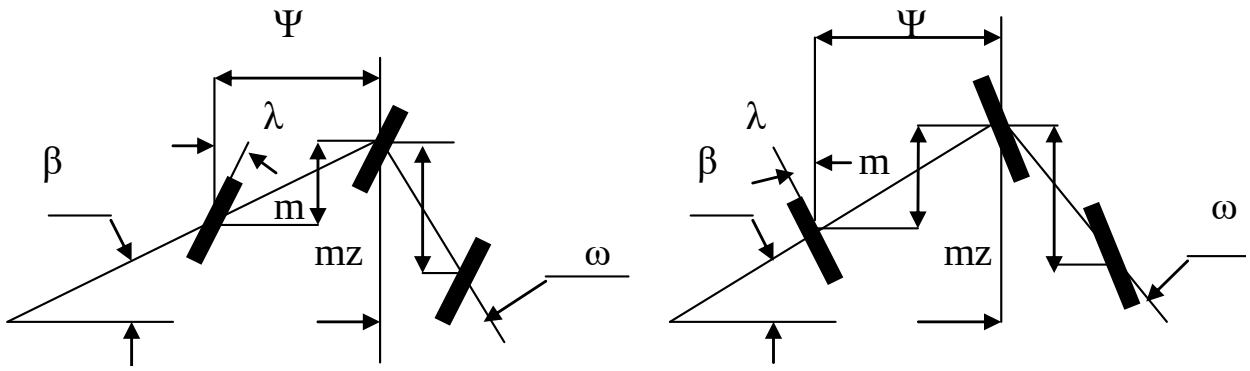
Fig. 6. Location of plates on the auxiliary helix of the right direction (β) on the cutting mills with the right direction of the tooth helix (ω) but opposite inclination angles of the cutting edges of inserts (λ); Ψ – rotation angle of the cutter body for adjacent slots processing for inserts; m – displacement of plates relative to each other on the auxiliary helix in adjacent rows of teeth; z – number of rows of teeth (insert location); a – inclination angle of the cutting edge of the insert (λ) coincides with the direction of the tooth helix; b – inclination angle of the cutting edge of the insert (λ) is opposite to the direction of the tooth helix



a *b*

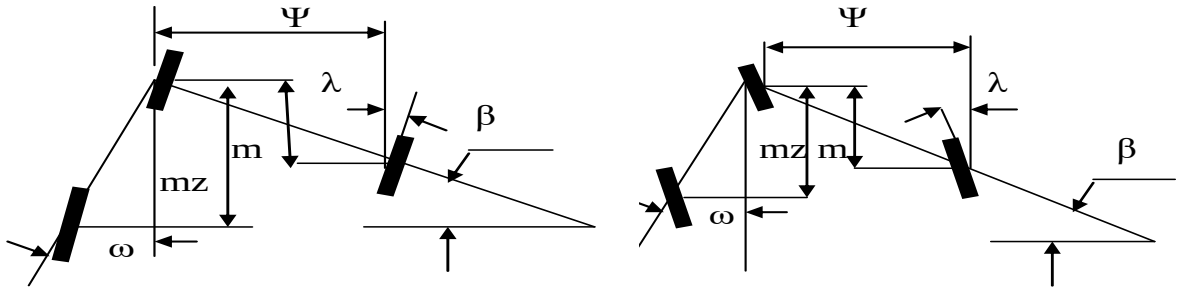
Рис. 7. Расположение пластин на вспомогательной винтовой линии левого направления (β) на фрезах с левым углом наклона винтовой линии (ω), но противоположными углами наклона режущих кромок пластин (λ); a – угол наклона режущей кромки пластины (λ) не совпадает с направлением винтовой линии зуба; b – угол наклона режущей кромки пластины (λ) совпадает с направлением винтовой линии зуба

Fig. 7. Location of plates on the auxiliary helix of the left direction (β) on the cutting mills with the left inclination angle of helix (ω) but opposite inclination angles of cutting edges of inserts (λ); a – inclination angle of the cutting edge of the insert (λ) does not coincide with the direction of the tooth helix; b – inclination angle of the cutting edge of the insert (λ) coincides with the direction of the tooth helix



a *b*

Рис. 8. Расположение пластин на вспомогательной винтовой линии правого направления (β) на фрезах с левым углом наклона винтовой линии (ω), но противоположными углами наклона режущих кромок пластин (λ); a – угол наклона режущей кромки пластины (λ) не совпадает с направлением винтовой линии зуба; b – угол наклона режущей кромки пластины (λ) совпадает направлению винтовой линии зуба
Fig. 8. Location of plates on the auxiliary helix of the right direction (β) on the cutting mills with the left inclination angle of helix (ω), but opposite inclination angles of cutting edges of inserts (λ); a – inclination angle of the cutting edge of the insert (λ) does not coincide with the direction of the tooth helix; b – inclination angle of the cutting edge of the insert (λ) coincides with the direction of the tooth helix



a *b*

Рис. 9. Расположение пластин на вспомогательной винтовой линии левого направления (β) на фрезах с правым направлением винтовой линии (ω), но противоположными углами наклона режущих кромок пластин (λ); a – угол наклона режущей кромки пластины (λ) совпадает с направлением винтовой линии зуба; b – угол наклона режущей кромки пластины (λ) противоположен направлению винтовой линии зуба
Fig. 9. Location of plates on the auxiliary helix of the left direction (β) on the cutting mills with the right helix (ω), but opposite inclination angles of cutting edges of inserts (λ); a – inclination angle of the cutting edge of the insert (λ) coincides with the direction of the tooth helix; b – inclination angle of the cutting edge of the insert (λ) is opposite to the direction of the tooth helix

Предложенная схема расположения пластин по вспомогательной винтовой линии позволяет выполнять позиционирование для обработки ложементов под пластины только два движения, а именно – поворот корпуса фрезы на угол Ψ и осевое смещение смежных гнезд под пластины на величину m. Это значительно упрощает управляющие программы и повышает точность обработки за счет отсутствия необходимости отдельной обработки каждого ряда зубьев, это исключает появление накопленной ошибки при фрезеровании смежных рядов ложементов под пластины. Разработанные конструкции фрез приведены на рис. 10, 11.

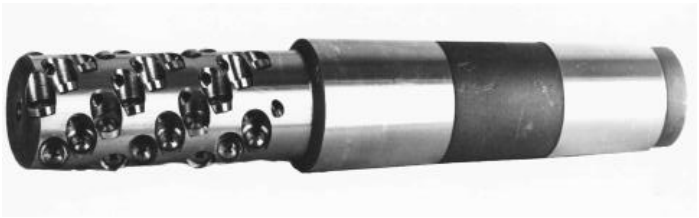


Рис. 10. Концевые фрезы с неперетачиваемыми пластинками цилиндрической формы
Fig. 10. End mills with disposable cylindrical inserts

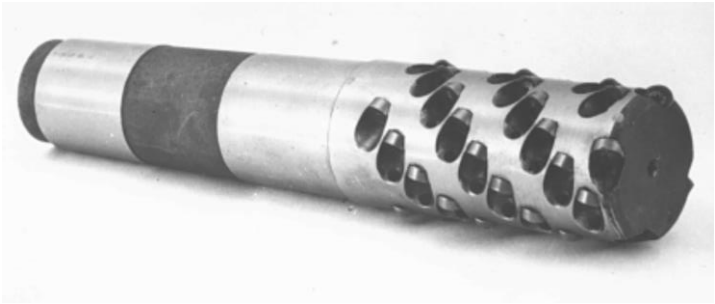


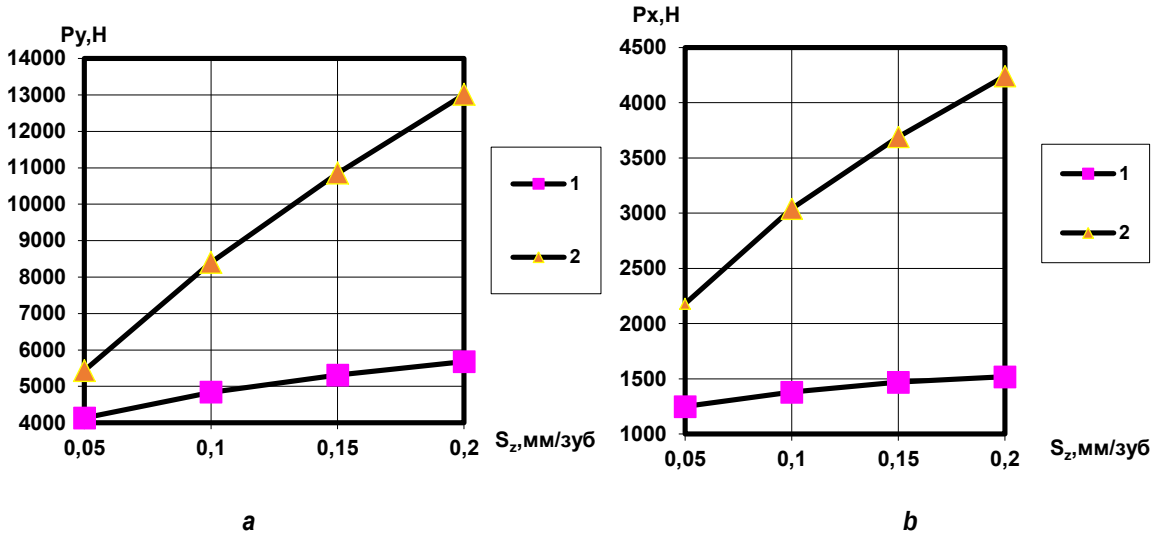
Рис. 11. Сборная концевая фреза с рабочей торцовой частью
Fig. 11. Modular end mill with a working face part

Фрезы, приведенные на рис. 10, предназначены в основном для контурной обработки в условиях незначительной нагрузки на торцовую часть. Это связано с тем, что вспомогательная винтовая линия начинает свой отсчет от торца. С учетом этого на торце расположена только одна пластинка. При значительной нагрузке на торец фрезы вспомогательная винтовая линия начинает свой отсчет от плоскости, проходящей через среднюю часть пластин, равномерно расположенных на торце (см. рис. 11). Это обеспечивает работоспособность торцовой части, но приводит к снижению числа рядов зубьев на 1 или 2 ряда в зависимости от диаметра. Фрезы данного исполнения целесообразно проектировать с правым направлением углов наклона винтовых линий зубьев для обеспечения хорошего отвода стружки из глубоких карманов. Далее были выполнены лабораторные и производственные исследования разработанных конструкций фрез. Лабораторные исследования были выполнены на станке ФП 17МН при фрезеровании заготовок из титанового сплава ВТ20 ($\sigma_в$ = 1000 МПа) и высокопрочной нержавеющей стали ВНС-2 ($\sigma_в$ = 1100 МПа). Для измерения сил фрезерования был применен динамометрический стол СТМ-2, оснащенный дифференциальными бесконтактными индуктивными датчиками. Для сравнения были применены концевые фрезы по отраслевой документации. Полученные результаты приведены на рис. 12–14.

Выполненные исследования позволили установить, что эффективность применения возрастает по мере ужесточения условий эксплуатации, а именно – увеличения толщины среза (подачи на зуб), ширины и глубины фрезерования. Снижение составляющей силы подачи *Px* при увеличении глубины фрезерования (рис. 13) объясняется тем, что в процессе резания происходит изменение направления силы резания, а динамометрическая платформа регистрирует разность действующих сил[2] [13]. Дополнительно была исследована возможность интенсификации режимов чернового фрезерования.

Сборные концевые фрезы были испытаны в лабораторных и производствен-

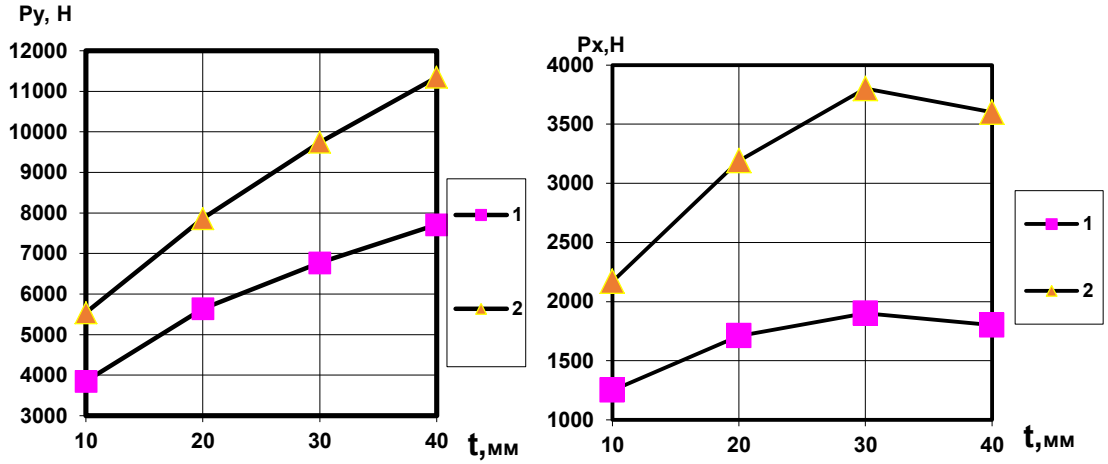
[2]Балла О.М. Экспериментальные методы исследования в технологии машиностроения: учеб. пособ. СПб.: Лань, 2019. 168 с.



a *b*

Рис. 12. Зависимость составляющих сил резания (Py) (a) и (Px) (b) от подачи на зуб (s_z): 1 – сборная концевая фреза с цилиндрическими пластинками; 2 – эталонная концевая фреза ВТ20 (d = 50 мм, z = 4, ВК8, t = 10 мм, B = 60 мм)

Fig. 12. Dependence of components of cutting forces Py (a) and Px (b) on feed per tooth (s_z): 1 – modular end mill with cylindrical inserts; 2 – VT20 reference end mill (d = 50 mm, z = 4, VK8, t = 10 mm, B = 60 mm)



a *b*

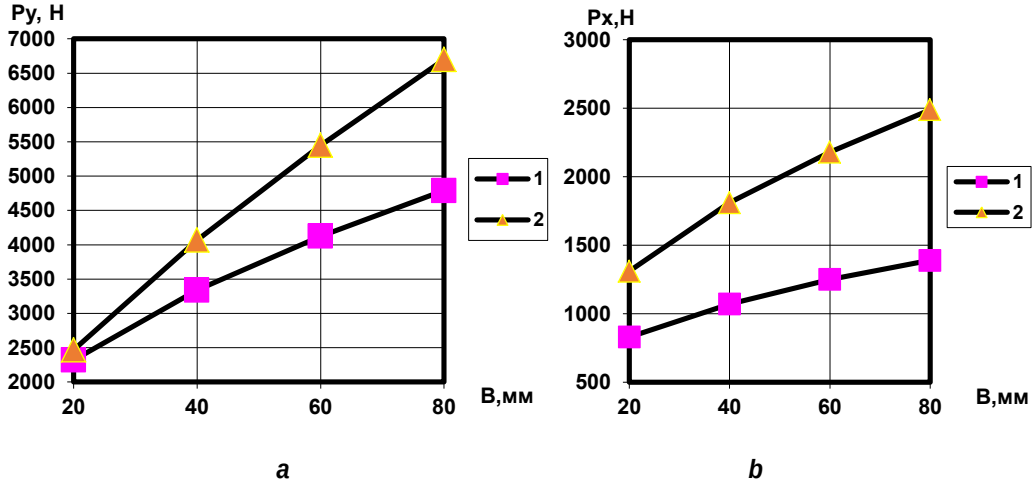
Рис. 13. Зависимость составляющих сил резания (Py) (a) и (Px) (b) от глубины фрезерования (t): 1 – сборная концевая фреза с цилиндрическими пластинками ВТ20 (d = 50 мм, z = 4); 2 – эталонная концевая фреза ВК8 (Sz = 0,1 мм/зуб, B = 60 мм)

Fig. 13. Dependence of components of cutting forces (Py) (a) and (Px) (b) on milling depth (t): (t): 1 – VT20 modular end mill with cylindrical inserts (d = 50 mm, z = 4); 2 –VK8 reference end mill (Sz = 0.1 mm / tooth, B = 60 mm)

ных условиях при фрезеровании деталей из стали ВНС-2 (08Х15Н5Д2Т, $\sigma_в$ = 1000 МПа) и титанового сплава ВТ20 ($\sigma_в$ = 1000 МПа) с удаленной коркой. Необходимость удаления корки с деталей из титановых сплавов была обусловлена тем, что фрезы были оснащены пластинками из быстрорежущей стали Р18. Обработка деталей выполнялась на следующих режимах: скорость резания *V* = 19,6 м/мин, ширина фрезерования *B* = 80 мм, глубина фрезерования *t* = 15–40 мм, минутные подачи, соответственно, *Sмин* = 100 мм/мин (для лабораторных условий) и *Sмин* = 80 мм/мин

(для производственных) стали ВНС-2 и *Sмин* = 80 мм/мин и *Sмин* = 50 мм/мин – для титанового сплава, что выше, чем для фрез, применяемых на производстве при черновой обработке. Стойкость фрез при этом находилась в пределах от 1,5 до 2 ч. При оснащении фрез пластинками из твердого сплава ВК8 интенсивность минутного съема металла возрастает в 1,4–2,8 раза. Эффективность фрез зависит от смещения режущих кромок. Зависимость смещения кромок смежных зубьев от диаметра приведена на рис. 15.

Смещение режущих кромок характеризует изменение соотношений меду толщиной и шириной среза. При уменьшении смещения происходит увеличение отношения толщины среза к ширине, что наряду со снижением сил резания обеспечивает меньшую интенсивность вибраций [14–17]. С учетом того, что экспериментальное определение параметров фрез очень трудоемко, возникла необходимость формализации процесса проектирования. Исходными данными для проектирования



a *b*

Рис. 14. Зависимость составляющих сил резания (Py) (a) и (Px) (b) от ширины фрезерования (B): 1 – сборная концевая фреза с цилиндрическими пластинками; 2 – эталонная концевая фреза ВТ20 (d = 50 мм, z = 4); ВК8 (Sz = 0,1 мм/зуб, B = 60 мм, t = 10 мм)

Fig. 14. Dependence of components of cutting forces (Py) (a) and (Px) (b) on milling width (B): 1 – modular end mill with cylindrical inserts; 2 – VT20 reference end mill (d = 50 mm; z = 4); VK8 (Sz = 0.1 mm/tooth; B = 60 mm; t = 10 mm)

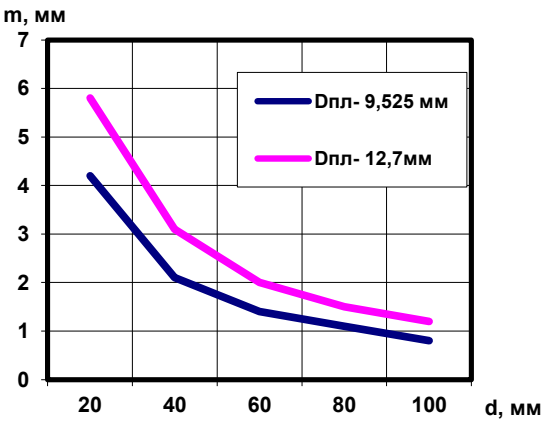


Рис. 15. Зависимость смещения режущих кромок (m) от диаметра фрезы (d)

Fig. 15. Cutting edge displacement (m) vs mill diameter (d)

являются диаметр фрезы, диаметр пластин, обрабатываемый материал, ширина и глубина фрезерования, углы наклона режущих кромок пластин и рядов зубьев, конструктивное исполнение хвостовика фрезы.

Математическая модель формирования переменной схемы резания с расположением режущих элементов на вспомогательной винтовой линии позволила формализовать расчет параметров рабочей части фрез. Расчет выполняется в следующей последовательности:

1. Определяем углы подъема технологической винтовой линии следующими зависимостями:

$$arctg\beta = \frac{D_{пл}\cos\lambda}{\pi d \pm D_{пл}\cos\lambda tg\omega}; \quad (2)$$

$$arctg\beta = \frac{\left(D_{пл} + 2S_{пл}\sin\lambda\right)\cos\lambda}{\pi d \pm \left[\left(D_{пл} + 2S_{пл}\sin\lambda\right)\cos\lambda\right]tg\omega}, \quad (3)$$

где β – угол подъема вспомогательных винтовых линий; *Dпл* – диаметр пластинки; *d* – диаметр фрезы; λ – угол наклона режущей пластинки; «+» – для случаев, когда угол наклона винтовой линии зуба, образованного дискретными режущими кромками, совпадает с углом наклона пластин, «–» – когда направления противоположны.

Формула (2) для схем расположения пластин в соответствии с рис. 6 *а*, 7 *а*, 8 *а*, 9 *а*, формула (3) – соответственно, для рис. 6 *b*, 7 *b*, 8 *b*, 9 *b*. Праворежущие фрезы с левым направлением винтовой линии расположения пластин рекомендуется применять для обработки открытых контуров деталей.

2. Определяем число смежных рядов зубьев для концевых и цилиндрических фрез по следующей зависимости:

$$z^1 = \frac{360°}{\frac{360°(5+S_{пл})}{\pi d} \mp \gamma + \arccos\frac{R\cos\gamma - (D_{пл}+1)}{R}}, \quad (4)$$

полученный результат округляют до большего ближайшего значения.

3. Окружной шаг расположения пластин определяется формулой

$$\psi = \frac{360°}{Z}\left(1 \pm \frac{D_{пл}\pi dtg\omega}{\cos\lambda \pm tg\omega\sin\lambda}\right). \quad (5)$$

4. Смещение пластин в смежных рядах зубьев:

$$m = \frac{D \bullet ‘}{\left(\cos\lambda \pm tg\omega\sin\lambda\right)z}. \quad (6)$$

Смещение пластин в смежных рядах зубьев формирует следующий макрорельеф обработанной поверхности (рис. 16).

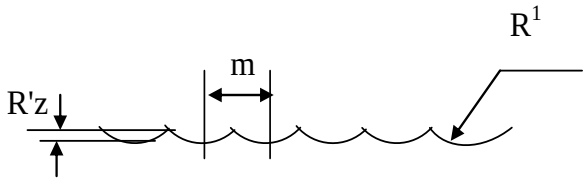


Рис. 16. Макрорельеф обработанной поверхности: R'z – высота остаточного гребешка, формируемого смежными пластинками цилиндрической формы; m – смещение пластин в смежных рядах зубьев; R^1 – проекция радиуса пластины на плоскость, проходящей через ось фрезы
Fig. 16. Macrorelief of the treated surface: R'z – height of the residual comb formed by adjacent cylindrical plates; m – displacement of the plates in adjacent rows of teeth; R^1 – projection of the plate radius on the plane passing through the cutting mill axis

Параметры макрорельефа без учета биения режущих кромок пластин можно определить по следующим формулам:

$$R^1 = R \bullet ‘\cos\lambda; \quad (7)$$

$$R_Z^1 = 0,5\left(D_{пл}\cos\lambda - \sqrt{D^2{}_{пл}\cos^2\lambda - m}\right). \quad (8)$$

При достаточно большом диаметре инструмента возможно получение макрорельефа, сопоставимого с высотой микронеровностей обработанной поверхности. Зависимость смещения режущих кромок от высоты микронеровностей без учета влия-

ния биения режущих кромок для пластин диаметром 9,525 и 12,7 мм приведена на рис. 17.

На рис. 17 размеры пластин соответствуют международному ряду размеров для неперетачиваемых режущих элементов.

Выполненные расчеты и экспериментальные работы показали, что при смещении режущих кромок менее 1 мм возможно получение сопоставимого с черновой и получистовой обработкой рельефа (R_z менее 50 мкм).

При проектировании фрез небольших диаметров, особенно при использовании пластин увеличенной толщины или при необходимости создания больших значений передних углов для пластин с плоской передней поверхностью, может иметь место вторичный контакт по боковым сторонам пластин, см. рис. 18.

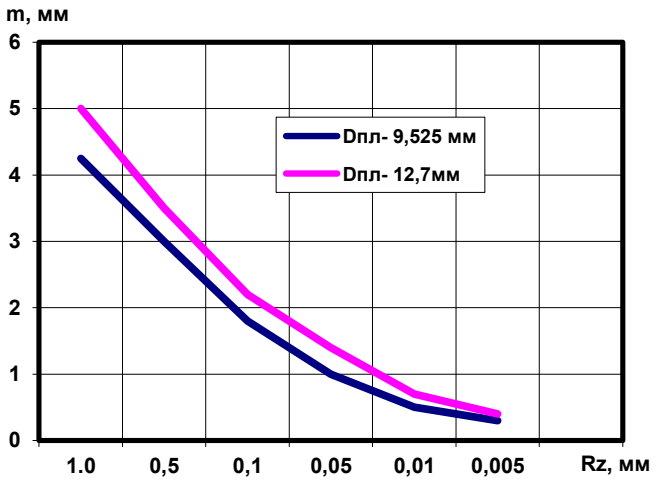
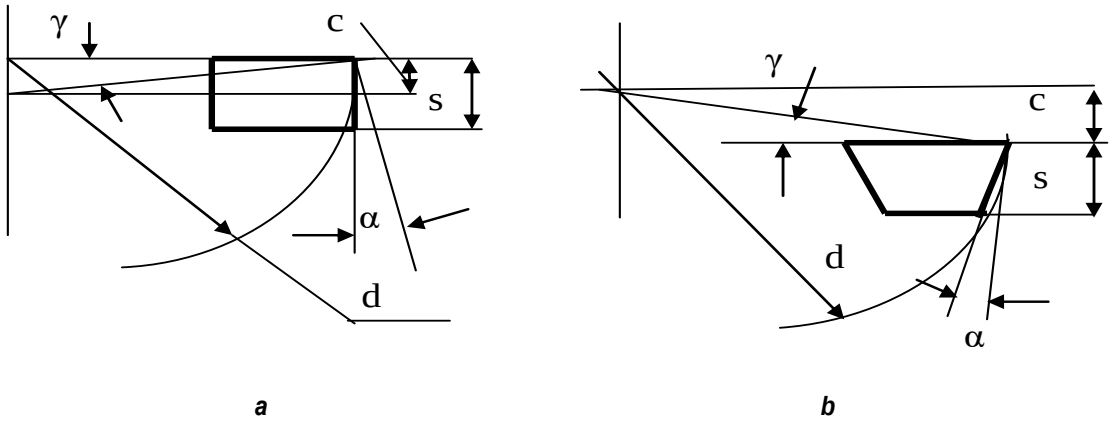


Рис. 17. Зависимость смещения режущих кромок в смежных рядах зубьев (m) от высоты макронеровностей (Rz)
Fig. 17. Dependence of cutting edge displacement in adjacent rows of teeth (m) on the heights of macro roughnesses (Rz)



a ***b***

Рис. 18. Затирание поверхностей резания неперетачиваемыми пластинками: a – негативные пластинки; b – позитивные пластинки; γ – передний угол; α – задний угол; s – толщина пластинки; c – размер определяющий значения переднего угла в корпусе фрезы. Значения задних углов в корпусах равны: для негативных пластин с плоской передней поверхностью α = γ; для позитивных α = $α_{пл}$ – γ
Fig. 18. Rubbing of cutting surfaces by disposable inserts: a – reverse inserts; b – positive inserts; γ – front angle; α – rear angle; s – insert thickness; c – size determining the values of the front angle in the cutter body. The values of the rear angles in the bodies are equal: for reverse inserts with a flat front surface: α = γ; for positive inserts: α = $α_{pl}$ – γ

ISSN 1814-3520

С учетом этого при проектировании фрез небольших диаметров или с большими положительными углами необходимо выполнять проверку на отсутствие затирания поверхности резания задней поверхностью неперетачиваемых пластин.

Проверка на отсутствие затирания пластин по задней поверхности выполняется по следующим формулам:

– для негативных пластин

$$c = \frac{d}{2}\cos\gamma > \frac{s}{2}; \quad (9)$$

– для позитивных пластин

$$arcsin\frac{\frac{d}{2}cos\gamma + s}{\frac{d}{2}} < \alpha_{пл}, \quad (10)$$

где s – толщина пластины; $\alpha_{пл}$ – задний угол пластинки.

Заметим, что для отрицательных значений передних углов размер «*c*» для пластин с плоской передней поверхностью всегда расположен выше плоскости, проходящей через ось фрезы, а для положительных – ниже.

Если эти условия не выполняются, то необходимо рассмотреть следующие варианты изменения конструкций:

– увеличить диаметр инструмента (если возможно);

– применить пластины меньшей толщины;

– применить пластины с большими значениями задних углов;

– уменьшить значение положительного переднего угла для позитивных пластин или увеличить отрицательное, соответственно, для негативных пластин;

– применить пластинки с фасонной передней поверхностью, это даст возможность установить пластину под углом, исключающим затирание;

– применить доработку пластин для образования вспомогательного заднего угла, схема доработки пластин приведена на рис. 19.

Значения параметров для доработки пластин можно определять графически в среде AutoCAD или расчетным методом. Значение l не должно превышать 0,5 S. Значения вспомогательных задних углов определяются формулами:

– для негативных пластин

$$\alpha_1 = arcsin\frac{2|c-s|}{d} + 2\text{–}4; \quad (11)$$

– для позитивных пластин

$$\alpha_1 = arcsin\frac{2(c+s)}{d} + 2\text{–}4. \quad (12)$$

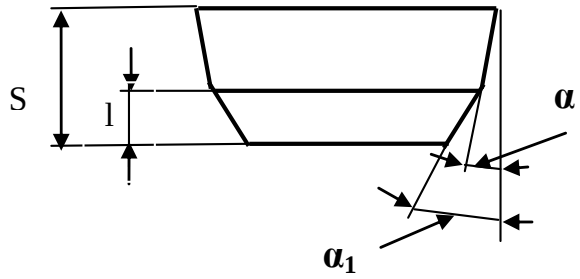


Рис. 19. Доработка пластин по задней поверхности для исключения затирания обработанной поверхности боковой поверхностью пластин: α – задний угол пластины; a_1 – вспомогательный задний угол пластины; l – размер фаски вспомогательного заднего угла пластины
Fig. 19. Plate finishing on a flank surface to exclude rubbing of the treated surface by the lateral side of plates: α – rear angle of the plate; α' – auxiliary rear angle of the plate; l – chamfer size of the auxiliary rear angle of the plate

Испытания фрез в производственных условиях показали, что в разных по знаку углов наклона режущих кромок пластин или изменении схемы фрезерования может наблюдаться самораскрепление винтов под действием сил резания. Для исключения жесткой специализации по схемам фрезерования и необходимости применения винтов с правой или левой резьбой необходимо на пластинах и, соответственно, корпусах предусматривать замки для исключения возможности поворота пластин под действием сил резания. Типовые оформления замков на пластинах приведены на рис. 20 [18].



a *b*

Рис. 20. Форма боковой поверхности пластин (a) и (b) для исключения произвольного проворота под действием сил резания
Fig. 20. Shape of the side surface of plates (a) and (b) to exclude an arbitrary rotation under the action of cutting forces

На рис. 20 *a* применена огранка боковой поверхности пластинки, на рис. 20 *b* – надрезы. При установке пластин в корпус фрезы они входят в контакт с фиксаторами в ложементах и тем самым исключают самопроизвольный их поворот под действием сил резания. Если вектор действия сил совпадает с направлением резьбы, то пластинка при ее повороте дополнительно закрепляется, что может затруднить ее замену, если их направления противоположны, то имеет место самораскрепление пластинок, приводящее к их разрушению. При черновом фрезеровании сила подачи меняет свое направление [13], что снижает надежность закрепления режущих элементов. Применение замков, как показали лабораторные и производственные испытания, исключило самораскрепление пластин в условиях низкой жесткости технологической системы и при изменении направления силы подачи.

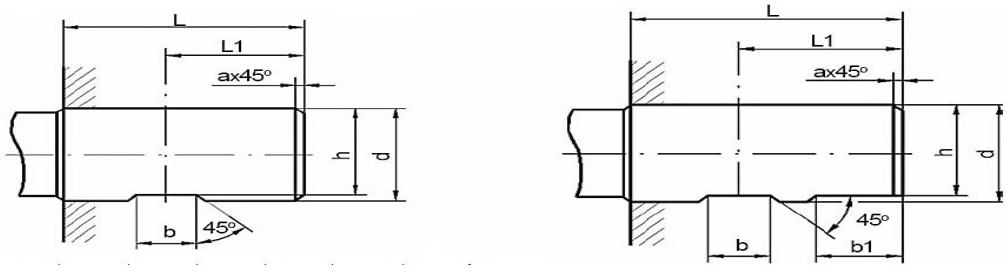
При проектировании фрез рекомендуется применять следующие исполнения их хвостовиков:

1. Основным недостатком цилиндрических хвостовиков типа «Weldon» является повышенное биение режущих кромок за счет односторонней выборки зазоров при закреплении винтами в радиальном направлении. Достоинством данных хвостовиков является простота конструкции и надежная передача крутящих моментов, повышенное биение в какой-то степени компенсируется повышением точности до $h5^3$.

Конструкция хвостовика приведена на рис. 21, а размеры – в табл. 1.

Хвостовики рис. 21 *a* применяются для фрез диаметром до 20 мм включительно, для больших диаметров – в соответствии с рис. 21 *b*.

Хвостовики с лысками не допускается применять в гидропластных, гидравлических, цанговых термопатронах. Их применение приведет к остаточным деформациям и, соответственно, к преждевременной потере точности. Для патронов, использующих для закрепления упругую деформацию (Tribos), их применение допускается. При обработке поверхностей большой протяженности в условиях интенсивных вибраций при закреплении фрез в патронах *«Weldon»* могут наблюдаться случаи самораскрепления крепежных винтов. С учетом этого при их проектировании для решения вопросов импортозамещения необходимо применять винты с мелким шагом или полиуретановыми кольцами для стопорения.



a *b*

Рис. 21. Цилиндрический хвостовик (a) и (b) по DIN1835
Fig. 21. Cylindrical shank (a) and (b) by DIN 1835

Таблица 1

Рекомендуемые исполнительные размеры цилиндрического хвостовика типа «Weldon»

Table 1

Recommended operation sizes of Weldon type cylindrical shank

Размеры хвостовиков, мм						
dh5	20	25	32	40	50	63
L^{+2}	50	56	60	70	80	90
L1	25	32	36	40	45	50
h	18,2	23	30	38	47,8	60,8
$b^{+0,05}$	11	12	14	14	18	18
$b1^{+1}$	–	17	19	19	23	23
a	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

2. Цилиндрические хвостовики с резьбой. Фрезы с цилиндрическими хвостовиками с резьбой в настоящее время находят ограни ченное применение из-за сложности конструкций цанговых патронов и цанг с резьбой и высокого биения режущих кромок фрез при закреплении. Область применения – черновое фрезерование.

Конструкция хвостовика приведена на рис. 22, а размеры – в табл. 2.

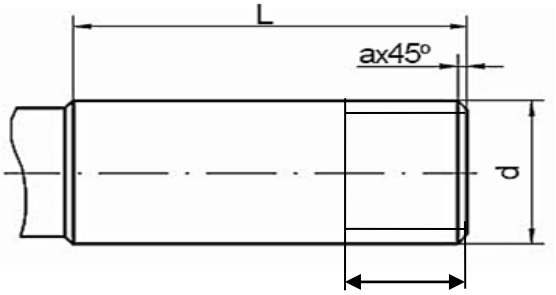


Рис. 22. Цилиндрический хвостовик с резьбой
Fig. 22. Cylindrical shank with thread

3. Хвостовики типа «Save Lock». Для повышения надежности закрепления инструмента в условиях больших нагрузок формой «Haimer» разработан специальный цилиндрический хвостовик, рис. 23 [19].

Данные исполнения хвостовиков обеспечивают:

– высокую точность закрепления, как правило, не хуже 3 мкм;

– передачу больших крутящих моментов;

– исключают вытягивание фрез из патронов под действием осевых составляющих сил фрезерования.

Применение хвостовиков возможно во всех типах прецизионных патронов с замками.

Таблица 2

Исполнительные размеры цилиндрического хвостовика фрез с резьбой

Table 2

Operation sizes of a threaded cutter cylindrical shank

Размеры хвостовиков, мм						
dh5	20	25	32	40	50	63
L^{+2}	50	56	60	70	80	90
c	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
резьба M	20	24	30	38	47	60
S	1,5	2	2	2	2	2
l	14	16	16	20	20	20



Рис. 23. Цилиндрический хвостовик типа «Save Lock»
Fig. 23. Cylindrical shank of a Save Lock type

4. Хвостовики с конусностью 7/24:

– CK (SK) для станков с ручной сменой инструмента по стандартам DIN 2080 и ГОСТ 25827-93[4];

– NC для станков со сменой инструмента манипулятором по европейским стандартам DIN 69871, ISO 7388/1[4];

[3]Балла О.М. Инструментообеспечение современных станков с ЧПУ: учеб. пособ. СПб.: Лань, 2017. 200 с.
[4]ГОСТ 25827-93. Хвостовики инструментов с конусом 7:24. Размеры (Зажимные приспособления для станков фрезерно-расточной группы по DIN 69871. Форма A, AD и AD/B. Зажимные приспособления для станков фрезерно-расточной группы по DIN 2080. Хвостовики инструментов с конусом 7:24. Размеры по ИСО 7388-1-83. Зажимные приспособления с хвостовиком по JIS B 6339. Зажимные приспособления с хвостовиком JIS B 6339 по MAS 403. Хвостовики по CAT B5-50). Введ.01.01.1995. М.: Изд-во стандартов, 1994.

– MAC-BT для станков со сменой инструмента манипулятором по японским стандартам JIS B6339, MAS403;

– CAT для станков со сменой инструмента манипулятором по стандарту ANSI CAT B5-50.

Хвостовики рекомендуется применять на концевых фрезах для черновой обработки. Степень точности хвостовика АТ3, наибольшие диаметры концевых фрез указаны в табл. 3.

Таблица 3

Рекомендуемые наибольшие диаметры концевых фрез

Table 3

Recommended maximum diameters of end mills

Обозначение хвостовика СК, NC, MAS-BT, CAT	50	45	40	30
Наибольший диаметр концевой фрезы, мм	80	63	50	45

Примечание: исполнение хвостовика зависит от оборудования и должно быть согласовано с исполнением шпинделей станков, применяемых в производстве.

5. Конический хвостовик для станков с числовым программным управлением типа HSK DIN69893 рекомендуется применять на концевых фрезах с неперетачиваемыми пластинками, наибольшие диаметры концевых фрез приведены в табл. 4.

Таблица 4

Рекомендуемые наибольшие диаметры концевых фрез

Table 4

Recommended maximum diameters of end mills

Обозначение хвостовика HSK	125	100	80	63	50
Наибольший диаметр фрезы, мм	100	85	67	53	42

6. Хвостовики CAPTO рекомендуется применять на концевых фрезах с неперетачиваемыми пластинками, их наибольшие диаметры приведены в табл. 5.

7. Применение хвостовиков, обеспечивающих минимальное биение режущих кромок для фрез с неперетачиваемыми пластинками, является предпочтительным. Таким образом, по данным [20], уменьшение биения режущих кромок с 50 до 20 мкм приводит к увеличению стойкости в 2–3 раза. Дополнительно следует учесть, что пластины цилиндрической формы несложно изготовить с допуском на диаметр + 10 мкм, что значительно точнее чем на неперетачиваемые пластинки даже класса точности «F» для обработки материалов общего применения.

Таблица 5

Рекомендуемые наибольшие диаметры концевых фрез

Table 5

Recommended maximum diameters of end mills

Обозначение хвостовика CAPTO	C8	C6	C5	C4	C3
Наибольший диаметр фрезы, мм	80	63	50	40	32

3. ОБОБЩЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанные конструкции фрез прошли испытания в лабораторных и производственных условиях при обработке титановых сплавов ВТ6, ВТ20, ВТ22 и высокопрочных нержавеющих сталей ВНС-2, ВНС-5. Переменные схемы резания обеспечивают снижение сил резания в зависимости от смещения режущих кромок (диаметров фрез) от 1,5 до 3 раз и интенсификацию режимов фрезерования даже при применении традиционных инструментальных материалов не менее чем в 1,5–2 раза.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение специальных конструкций концевых фрез с неперетачиваемыми пластинками твердых сплавов, быстрорежущих сталей или дисперсионно-твердеющих инструментальных сплавов, в которых реализованы переменные схемы резания, обеспечивает эффективную черновую обработку деталей из титановых

ISSN 1814-3520

сплавов и высокопрочных сталей, в том числе и нержавеющих наподобие ВНС. Следует отметить, что интенсификация режимов фрезерования была обеспечена применением переменных схем резания среза без увеличения скорости резания. Предложенная методика расчета позволяет проектировать специальные фрезы в диапазоне диаметров от 20 до 100 мм с длиной рабочей части до 3 диаметров даже конструкторам средней квалификации.

Библиографический список

1. Белянин П.Н. Производство широкофюзеляжных самолетов. М.: Машиностроение, 1979. 358 с.
2. Белянин П.Н. Технология и оборудование для производства широкофюзеляжных самолетов в США. М.: Машиностроение, 1979. 255 с.
3. Горбунов М.Н. Основы технологии производства самолетов. М.: Машиностроение, 1976. 260 с.
4. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
5. Ларин М.Н. Высокопроизводительные конструкции фрез и их рациональная эксплуатация. М.: Машгиз, 1957. 272 с.
6. Балла О.М. Повышение эффективности механической обработки деталей из высокопрочных материалов путем применения фрез с переменными схемами резания // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. № 5. С. 10–27. http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-10-27
7. Михайлов Г.А. Анализ схем резания и способов разделения срезаемых слоев металла // Научные труды ВЗМИ. 1978. № 35. С. 25–29.
8. Балла О.М. Улучшение использования вольфрамосодержащих материалов в режущем инструменте // Вестник машиностроения. 1992. № 1. С. 44–46.
9. Зубарев Ю.М. Современные инструментальные материалы. Санкт-Петербург: Лань, 2008. 224 с.
10. Балла О.М. Проектирование концевых фрез // Вопросы авиационной науки и техники. Серия: Авиационная технология. 1989. Вып. 1. С. 65–75.
11. Люкшин В.С. Теория винтовых поверхностей в проектировании инструмента. М.: Машиностроение, 1968. 371 с.
12. Сидоренко С.М. Вычислительная геометрия в машиностроении. М.: Машиностроение, 1983. 160 с.
13. Балла О.М. Определение составляющих сил резания при фрезеровании методом полунатурного моделирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 11. С. 10–23.
14. Жарков И.Г. Управление интенсивностью автоколебаний − важный резерв повышения производительности и качества изделий // Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов: межвузовский сб. Куйбышев: Изд-во КУАИ им. С.П. Королева, 1976. Вып. 4. С. 99–105.
15. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1986. 179 с.
16. Brach K. Frasen und Aufbohren mit Werkzeugen mit tangentialen Wendeschneidplatttn // Werkstatt und Betrieb. 1981. Vol. 114. No. 4. P. 257–258.
17. Kahles J.F., Eylon D., Froes F.H., Field M. Machining of Titanium Alloys // Journal of Metals. 1985. Vol. 37. No. 4. P. 27–35.
18. New grade ctcs245 for milling heat resistant nickel-based alloys // Интернет-каталог «GD_KT_PRO-0731-0418_SUS_ABS_V1» [Электронный ресурс]. URL: http://download/Ceratizit.com.eng.pdf (24.07.2019).
19. Tooling technology // Интернет-каталог «Index» [Электронный ресурс]. URL: http://download/Haimer.com.eng.pdf (24.07.2019).
20. Кондратов А.С. Вопросы технологических режимов резания. М.: НИАТ, 1968. 62 с.

References

1. Belyanin PN. *Production of wide-body aircrafts.* Moscow: Mashinostroenie; 1979, 358 p. (In Russ.)
2. Belyanin PN. *Technology and equipment for the production of wide-body aircrafts in the United States*. Moscow: Mashinostroenie; 1979, 255 p. (In Russ.)
3. Gorbunov MN. *Fundamentals of aircraft manufacturing technology*. Moscow: Mashinostroenie; 1976, 260 p. (In Russ.)
4. Bobrov VF. *Fundamentals of the theory of metal cutting*. Moscow: Mashinostroenie; 1975, 344 p. (In Russ.)
5. Larin MN. *High-performance milling cutter designs and their rational operation*. Moscow: Mashgiz; 1957, 272 p. (In Russ.)
6. Balla OM. Improving machining efficiency of parts from high-strength materials through application of mills with alternative cutting patterns. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018;5: 10–27. http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-10-27
7. Mihajlov GA. Analysis of cutting patterns and separation methods of cut metal layers. *Nauchnye trudy Vsesoyuznogo zaochnogo mashinostroitel'nogo instituta* = Scientific works of All-Union Correspondence Engineering Institute. 1978;35:25–29. (In Russ.)
8. Balla OM. Improving the use of tungsten-containing materials in a cutting tool. *Vestnik mashinostroeniya* = Russian Engineering Research. 1992;1:44–46. (In Russ.)
9. Zubarev YuM. *Modern instrumental materials*. Saint-

Petersburg: Lan'; 2008, 224 p. (In Russ.)
10. Balla OM. End mill design. *Voprosy aviacionnoj nauki i tekhniki. Seriya: Aviacionnaya tekhnologiya* = Issues of Aviation Science and Technology. Series: Aviation Technology. 1989;1:65–75. (In Russ.)
11. Lyukshin VS. *Theory of helical surfaces in tool design*. Moscow: Mashinostroenie; 1968, 371 p. (In Russ.)
12. Sidorenko SM. Computational geometry in mechanical engineering. Moscow: Mashinostroenie; 1983, 160 p. (In Russ.)
13. Balla OM. In-line simulation-based determination of cutting force components at milling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2016;11:10–23. (In Russ.)
14. Zharkov IG. Control of self-excited oscillation intensity as an important reserve to increase productivity and product quality. In: *Issledovanie obrabatyvaemosti zharoprochnyh i titanovyh splavov* = Research on heat-resistant and titanium alloy machinability: Interuniversity collection of articles. Kujbyshev: Kuibyshev aviation Institute named after S.P. Korolev; 1976, Issue 4, p. 99–105. (In Russ.)
15. Zharkov IG. *Vibrations when machining with a blade tool*. Leningrad: Mashinostroenie; 1986, 179 p. (In Russ.)
16. Brach K. Frasen und Aufbohren mit Werkzeugen mit tangentialen Wen-deschneidplatttn. Werkstatt und Betrieb. 1981;114(4):257–258.
17. Kahles JF, Eylon D, Froes FH, Field M. Machining of Titanium Alloys. Journal of Metals. 1985;37(4):27–35.
18. New grade ctcs245 for milling heat resistant nickel-based alloys. Internet catalog *GD_KT_PRO-0731-0418_SUS_ABS_V1.* Available from: http://download/Ceratizit.com.eng.pdf [Accessed 24th July 2019]. (In Russ.)
19. Tooling technology. Index Internet catalog. Available from: http://download/Haimer.com.eng.pdf [Accessed 24th July 2019]. (In Russ.)
20. Kondratov AS. *Issues of technological cutting modes*. Moscow: National Institute of Aviation Technologies; 1968, 62 p. (In Russ.)

Критерии авторства

Балла О.М. провел исследования, подготовил статью к публикации и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Authorship criteria

Balla O.M. has conducted the study, prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Балла Олег Михайлович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: ballaom@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Oleg M. Balla,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: ballaom@mail.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.7.019.7
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-25-35

Удаление заусенцев с малогабаритных высокоточных деталей для сверхвысокочастотной электроники

© Ю.И. Карлина, Д.А. Журавлев
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – определение ограничений при выборе материалов для изготовления деталей коаксиальных радиокомпонентов для сверхвысокочастотной микроэлектроники, выявление особенностей и проблем при их изготовлении, исследование применяемых способов решения проблемы возникновения и удаления заусенцев, выбор перспективных методов удаления заусенцев для осуществления экспериментов и оценки эффективности их применения. Проведены описание особенностей технологии изготовления деталей радиокомпонентов для сверхвысокочастотной электроники, классификация номенклатуры деталей по геометрии и используемым материалам для выбора метода борьбы с заусенцами, описание и сравнение результатов применения опробованных методов удаления заусенцев с деталей, изготавливаемых из материалов 29НК и бериллиевой бронзы на токарных автоматах продольного точения, а также сделан подбор перспективных методов удаления заусенцев для дальнейшего исследования. Качественное удаление заусенцев с деталей, изготавливаемых из материалов 29НК и бериллиевой бронзы на токарных автоматах продольного точения (не имеющих труднодоступных поверхностей), достигается применением «галтовки с подбором абразивной среды». Качественное удаление заусенцев с деталей, изготавливаемых из материалов 29НК и бериллиевой бронзы на токарных автоматах продольного точения, имеющих труднодоступные поверхности (пазы, карманы, боковые отверстия, канавки, резьбы и т.п.) можно получить при помощи робота для зачистки, устанавливаемого на каждый станок, галтовки с подбором абразивной среды с последующей ручной слесарной операцией, термическим устранением заусенцев, а для материала 29НК – посменной заменой подобранного режущего инструмента для чистовой обработки. Недостаточно исследованы такие перспективные методы удаления заусенцев на данном производстве как автоматизация слесарной обработки с применением робота, термическое устранение заусенцев, подбор инструмента и режимов обработки по каждому виду материалов с учетом конструкции деталей.

Ключевые слова: удаление заусенцев, финишная обработка, малогабаритные детали, труднодоступные внутренние поверхности, продольное точение, автоматизация слесарной обработки

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-901184.

Информация о статье: Дата поступления 25 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 26 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Карлина Ю.И., Журавлев Д.А. Удаление заусенцев с малогабаритных высокоточных деталей для сверхвысокочастотной электроники. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 1. С. 25–35. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-25-35

Deburring of small high-precision parts for ultra high frequency electronics

Yuliya I. Karlina, Diomid A. Zhuravlev
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to identify the limitations when selecting materials for the production of coaxial radio component parts for ultra-high-frequency microelectronics, to reveal the features and problems in their manufacturing, to study the methods used to solve the problem of burr formation and removal, to choose promising deburring methods for experiment setting and evaluation of their effectiveness. The article describes the features of the manufacturing technology of radio component parts for ultra-high-frequency electronics, gives part assortment classification by geometry and used materials for the selection of a deburring method. It also describes and compares the application results of proven deburring methods on parts made from 29NK (29НК) and beryllium bronze on longitudinal turning machines. Promising deburring methods are selected for further research. High-quality deburring of parts made of 29NK and berylli-

um bronze materials and having no hard-to-reach surfaces on longitudinal turning machines is achieved by using "tumbling with the selected abrasive medium". High-quality deburring of parts made of 29NK and beryllium bronze materials and having hard-to-reach surfaces (slots, pockets, side holes, grooves, threads, etc.) on longitudinal turning machines can be performed through the use of a cleaning robot installed on each machine-tool, tumbling with abrasive medium selection followed by manual benchworking, thermal removal of burrs, and for 29NK material - by orderly changing of the selected cutting tool for finishing treatment. The following promising methods including benchwork automation with the use of a robot, thermal deburring, selection of tools and processing modes for each type of material taking into account the design of parts have not been sufficiently studied.

Keywords: deburring, finishing, small parts, hard-to-reach inner surfaces, longitudinal turning, automation of metal processing

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the scientific project no. 19-38-901184.

Information about the article: Received November 25, 2019; accepted for publication December 26, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Karlina YI, Zhuravlev DA. Deburring of small high-precision parts for ultra high frequency electronics. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):25–35. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-25-35

1. ВВЕДЕНИЕ

Импортозамещение электронной компонентной базы является одним из перспективных направлений развития предприятий радиоэлектронной промышленности. Коаксиальные радиокомпоненты для сверхвысокочастотной (СВЧ) микроэлектроники, такие как соединители, СВЧ-вводы, фильтры помех, низкочастотные вводы и стойки являются частью электронной компонентной базы. Техника передачи сигналов без искажений и потерь с микрополосковой линии на радиочастотный кабель или другую линию подвода напряжений питания и управляющих сигналов, фильтрации помех имеет важнейшее значение в современной радиоэлектронной аппаратуре.

2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является определение ограничений при выборе материалов для изготовления деталей коаксиальных радиокомпонентов для СВЧ-микроэлектроники, выявление особенностей и проблем при их изготовлении, исследование применяемых способов решения проблемы возникновения и удаления заусенцев, выбор перспективных методов удаления заусенцев для проведения экспериментов и оценки эффективности их применения.

3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электромагнитное поле в коаксиальной линии находится между внутренним и наружным проводниками. При передаче сигнала по этим проводникам в тонком приповерхностном слое протекают токи. Требуемую для снижения в 2,71 раза амплитуды электромагнитной волны толщину слоя металла называют глубиной «скин-слоя». Чем выше частота и больше электропроводность и магнитная проницаемость металла, тем меньше глубина «скин-слоя». Токи протекают по наружному слою внутреннего проводника и по внутреннему слою наружного проводника. Глубина «скин-слоя» обусловливает выбор состава и толщины покрытия. Для СВЧ-техники необходимо покрыть проводники слоем серебра или золота толщиной несколько микрометров, чтобы обеспечить протекание поверхностного тока по хорошо проводящему слою и снизить потери в линии передачи. При этом для большинства случаев предпочтительнее золото, т.к. оно (в отличие от серебра) не окисляется.

Основные детали радиокомпонентов для СВЧ-электроники – это внутренний и наружный проводники и изолятор между ними. Для герметичных соединителей корпуса изготавливают из сплава 29НК или стали 15Х25Т для получения согласован-

ных по величине коэффициентов термического расширения спаев со стеклом С52-1; соединителей с нерегламентированной герметичностью корпуса изготавливают из нержавеющей стали или бериллиевой бронзы для изделий военного назначения, из латуни – для дешевых коммерческих соединителей [1].

Для изготовления внутренних проводников применяют латунь или бериллиевую бронзу, а для герметичных соединителей внутренний проводник (как и корпус) должен образовывать надежный сплав со стеклянным изолятором, с этой целью используют сплав 29НК. Гнездовой контакт соединителей должен быть достаточно упругим и обладать высокой электропроводностью. Эти свойства удачно сочетает бериллиевая бронза.

Внутренний и наружный проводники имеют требования высокой точности размеров (10–50 мкм) и чистоты поверхности – заусенцы не допускаются.

Гнездовые контакты выпускают из бериллиевой бронзы из-за ее упругости. После механообработки (токарной и резки прорезей между ламелями) бериллиевую бронзу закаливают, и она становится пластичной, что позволяет обжать ламели гнезда.

Для снижения прямых потерь СВЧ, обеспечения паяемости и коррозийной стойкости внутренний и внешний проводники изготавливают с гальваническим покрытием. Толщина покрытия должна быть в несколько раз больше глубины «скин-слоя». Лучшим покрытием является износостойкое золото: сплавы золота с кобальтом, никелем и сурьмой. Гальваническое покрытие сплавом золото-кобальт образует твердое (микротвердость на менее 1863 $Н/мм^2$) износостойкое покрытие с низким контактным сопротивлением (0,4 мОм) [2]. Толщина покрытия – не более 2–3 мкм.

В рамках данного исследования проведены описание особенностей изготовления деталей радиокомпонентов для СВЧ-электроники, классификация номенклатуры деталей для выбора метода борьбы с заусенцами, описание и сравнение результатов применения опробованных методов удаления заусенцев с деталей, изготавливаемых из материалов 29НК и бериллиевой бронзы, а также проведен подбор перспективных методов удаления заусенцев для дальнейшего исследования.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности технологии изготовления деталей радиокомпонентов для СВЧ-электроники. Внутренние и наружные проводники выпускают на высокоточных станках с числовым программным управлением (ЧПУ) или часовых станках с последующим гальванопокрытием. В редких случаях наиболее элементарные токовыводы изготавливают малозатратным способом – штамповкой. Многие изделия, имеющие одни и те же технические характеристики, требуется выпускать в другом исполнении с учетом присоединительных размеров, используемых конкретными разработчиками радиоэлектронной аппаратуры.

С целью применения типовых технологических процессов номенклатура изделий, выпускаемых на станках с ЧПУ Иркутским релейным заводом (АО «Иркутский релейный завод»), подразделяется на группы в зависимости от геометрии выпускаемых изделий и применяемых материалов. В зависимости от геометрии изделия могут выпускаться на токарных (тела вращения) и фрезерных станках, а также детали без внутренних поверхностей (заусенцы удаляются путем галтовки – это технологический процесс механической обработки деталей при перемешивании с наполнителем, который может содержать абразив, применяется для обработки – от шлифовки до финишной полировки – поверхности деталей из различных материалов, металлов, сплавов черных, цветных и драгоценных, полимеров, стекла, керамики, минералов, дерева и др.) и имеющие внутренние поверхности (заусенцы удаляются путем галтовки только с внешних поверхностей). По используемым материалам номенклатура

разделяется на классы исходя из обрабатываемости материала на станках ЧПУ (наличие заусенцев, их характер, способы устранения, износостойкость инструмента).

Из номенклатуры изделий, выпускаемых на токарных автоматах продольного точения, можно выделить две большие группы изделий (детали), имеющих одинаковые особенности и проблемы:

– изготавливаемые из бериллиевой бронзы, имеющие пазы, карманы, боковые отверстия, канавки, резьбы и т.п. (например, корпус КАПД.724212030-02);

– изготавливаемые из железоникелевого сплава 29НК, имеющие пазы, карманы, боковые отверстия, канавки, резьбы и т.п. (например, втулка ФИМД.713.751.004).

Качество поверхности деталей во многом обеспечивает получение высокопроводящего поверхностного слоя необходимой толщины и его сохранение при сборке, что влияет на потребительские качества изделия радиоэлектронной аппаратуры. Основным дефектом поверхности при изготовлении этих деталей являются заусенцы, которые не допускаются по технической документации. Заусенцы – это излишки материала, выступающие на кромках и углах поверхностей детали, в виде гребенок с рваными краями толщиной более 0,01 мм, образующиеся в результате сдвига металла при штамповке и обработке резанием. Признанным определением заусенца является определение проекта международного стандарта. Заусенец – пластически деформированный материал, образованный на кромках детали в результате обработки резанием или резки (вырубки). Заусенец включает весь металл, выступающий за теоретическое пересечение двух поверхностей, которые прилегают к заусенцу. В некоторых случаях заусенец находится внутри теоретического пересечения, он может быть острым, рваным, прочно закрепленным или свободно висящим выступом, иметь выпуклость материала на кромке [3]. Недостаточная подготовка поверхности деталей перед нанесением покрытия (заусенцы, острая кромка, наличие загрязнений) приводит к ухудшению адгезии, образованию наростов на поверхности деталей [4]. Анализ исследований различных ученых показал, что образование заусенцев происходит вследствие пластической деформации впереди зоны резания обычно в двух направлениях одновременно – главного движения и подачи [3].

Подбор инструментов и параметров обработки для деталей из бериллиевой бронзы показал, что заусенцы на этих деталях появляются сразу даже при использовании нового высококачественного инструмента и оптимальных режимах обработки. Износостойкость инструмента для деталей из бериллиевой бронзы высокая. Эти детали обязательно идут на дополнительную обработку: галтовка (очищает от заусенцев наружные поверхности) и слесарная операция (зачистка шабером внутренних поверхностей, пазов, карманов и т.п.). Материал достаточно легко обрабатывается при зачистке.

Подбор инструментов и параметров обработки для деталей из железоникелевого сплава 29НК показал, что заусенцы на этих деталях появляются не сразу. При установке нового инструмента заусенцы отсутствуют примерно 12 ч работы станка. Имеется статистика зависимости качества деталей из материала 29НК от износа инструмента, которая показала, что время работы станка до появления заусенцев на деталях имеющейся номенклатуры при оптимальных режимах обработки составляет от 12 до 14 ч. Если через 12 ч менять инструмент, то дополнительная обработка не требуется, но инструмент остается практически не изношен и может использоваться для изготовления деталей из более мягких материалов или деталей, не имеющих внутренних поверхностей. При дальнейшей обработке без смены инструмента требуется дополнительная обработка: галтовка (очищает от заусенцев наружные поверхности) и слесарная операция (зачистка шабером внутренних поверхностей, пазов, карманов и т.п.). Заметим, что материал трудно обрабатывается при зачистке.

5. СПОСОБЫ УДАЛЕНИЯ ЗАУСЕНЦЕВ И ИХ ПРИМЕНИМОСТЬ В УСЛОВИЯХ ДАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

В условиях производства компонентов для СВЧ-электроники возможно применение различных способов удаления заусенцев: химическое вытравливание, галтовка, термическое устранение заусенцев, электрохимическое устранение заусенцев, слесарная операция, установка на станок стальных или керамических щеток, подбор режущего инструмента, использование роботов для зачистки. Применяемые для этой цели процессы галтовки, анодно-абразивный, химический, электроконтактный способы обработки имеют целый ряд недостатков, таких как конструктивная сложность исполнения, низкая эффективность, отсутствие возможности обрабатывать диэлектрические материалы и др.[1] [5–11]. Применение того или иного способа имеет разные стоимость, время и качество обработки [12–15].

В литературных источниках описаны финишные методы обработки в среде свободных абразивов.

1. Обработка сложных фасонных поверхностей и отверстий деталей воздушно-абразивными или воздушными жидкостно-абразивными струями [4, 6, 15].

2. Ударная обработка дробеструйным, пескоструйным, гидропескоструйным и гидрокавитационным методами [4].

3. Воздействие на порцию абразивного материала встречно-направленными спиралевидными потоками сжатого воздуха при обработке внутренних поверхностей, при котором абразивный материал начинает вращаться и образует кольцевой поток обрабатывающих струй. Сжатый воздух направляется спиралевидно вдоль обрабатываемых поверхностей в одну сторону и одновременно с этим изменяется противоположно по фазе интенсивности потока энергоносителя [4].

4. Ультразвуковое удаление кристаллами льда. Данный процесс ведется с применением ультразвуковых волн. В качестве технологической среды применяются кристаллы льда, непрерывно подающиеся с технологической жидкостью в течение всей обработки, размер кристаллов применяется равным 0,08–0,18 мм. Также температура технологической жидкости (например, воды) поддерживается в диапазоне (+1…+3)°С [4].

5. Анодно-абразивный способ, обработка ведется в среде электролита и абразивного наполнителя, которые находятся во вращающемся цилиндрическом барабане, где также размещен электрод. Данный способ обладает рядом недостатков: конструктивная сложность установки, обработка не токопроводящих материалов невозможна [4].

6. Обработка гранулами в рабочей камере, создаваемой внутри отверстия, под давлением. В обрабатываемое отверстие детали помещают гранулы между двумя уплотнителями, образовывая, таким образом, рабочую камеру, посредством уплотнителей рабочую среду сжимают (1–2 МПа). После этого ее перемещают вдоль оси канала обрабатываемой поверхности, вместе с этим технологической среде сообщают амплитудные колебания и силовые импульсы, что дает возможность обрабатывать детали переменного сечения по длине, а также имеющие форму эллипса в поперечном сечении [4].

7. Центробежная обработка внутренних поверхностей мелкоразмерных деталей в контейнерах с планетарным вращением, в частности, для полирования стенок каналов втулок, колец, труб [4, 9]. Для данной обработки применяют контейнер, которому сообщается планетарное вращение вокруг параллельных осей в противоположных направлениях. Технологическая среда загружается внутрь канала обрабатываемых деталей, закрываемых с од-

[1]Кобчиков В.С., Кудрявцев В.Н., Коротких М.Т., Никифоров В.И., Радкевич М.М. Электрофизические и электрохимические методы обработки и технологии в машиностроении: учеб. пособ.: в 2 ч. Ч. 1. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2017. 602 с.

ной стороны технологической заглушкой. Перед обработкой детали устанавливаются радиально в посадочные гнезда контейнера с жесткой фиксацией и наклоном к оси собственного вращения контейнера, обеспечивая циклическое осевое перемещение рабочей среды вдоль обрабатываемых поверхностей канала.

8. Многократное прокачивание возвратно-поступательным движением абразивной массы по давлением 1,5–15 МПа через каналы в деталях [4]. С целью повышения качества обработки направляющий элемент берут с отверстиями, плавно расширяющимися от торцовых поверхностей.

9. Подача абразивных зерен на обрабатываемые поверхности с помощью приспособления, вращающего периферийные лопатки для подбора и подачи абразивной среды на поверхность [4].

10. Струйно-абразивная обработка на основе вихревого закручивания потока суспензии позволяет увеличить тангенциальные составляющие скорости движения струи, что дает возможность повысить производительность процесса [4, 6, 15].

11. Заполнение отверстия детали жидкостью, имеющей свойство затвердевать в магнитном поле с последующим отведением вместе со стружкой в сборник [4].

12. Магнитоабразивная обработка отверстий, при которой в зазор между отверстием и индуктором помещают ферроабразивный порошок и приводят устройство магнитоабразивной обработки во вращение вокруг собственной оси и в планетарное движение. Индуктору также придается осевое колебательное движение [4].

13. Вибрационная обработка, при которой абразивные частицы совершают колебательное движение в вибрирующем станке одновременно с обрабатываемыми деталями [4, 10].

14. Центробежно-ротационная отделочно-зачистная обработка отверстий, основанная на формировании тороидального потока абразивных частиц. Технологическая среда вместе с обрабатываемыми заготовками совершает спиралевидное движение. Характерной чертой центробежно-ротационной обработки является то, что частям технологической массы рабочего резервуара, которая контактирует с вращающимся дном, сообщается дополнительное движение частиц относительно заготовок путем периодического реверсивного движения дна станка в течение цикла обработки [4, 9].

Известен метод электрохимической обработки, представляющий собой анодное растворение заусенца в среде поточного электролита под действием электрического тока. В технической литературе описаны два способа выполнения электрохимической очистки поверхностей:

– полное вытравливание заусенца, начиная с головки;

– вытравливание корня заусенца неподвижным электродом.

Электрохимическая обработка корпусных деталей штуцерной аппаратуры, имеющих внутренние каналы описана в[1] [7].

Метод финишной обработки абразивными щетками применяют для более крупных деталей, в частности, авиационные детали простой формы обрабатывают с помощью автоматических щеточных стационарных установок [17].

Для автоматизации слесарной обработки применяют робототехнические комплексы для удаления заусенцев, например, промышленный робот KUKAKR210 R2700 prime с дополнительной седьмой линейной осью, позволяющей увеличить рабочую зону робототехнического комплекса и повысить производительность обработки [16, 18].

Термоимпульсное устранение заусенцев является альтернативным абразивной обработке поверхностей методом устранения заусенцев и скругления кромок; с помощью установки Pulsar TI-576 позволяет снять заусенцы с металлических деталей любого профиля с использованием термического кратковременного импульса, за счет которого происходит снятие тепловой волной недостатков механической обработки [19–21]. Исследованы следующие способы борьбы с заусенцами:

– химическое вытравливание – удаляются тонкие заусенцы, широкие – нет;

– галтовка – удаляет заусенцы только с внешних поверхностей, подобран компаунд шампунь-концентрат OTEC SC96 и наполнители – гранитные гранулы GRA 2-5 или керамические пирамиды разных размеров, например, OTEC D2S4*4, используемые в зависимости от материала;

– электрохимическое устранение заусенцев – не опробовано, но известно, что если химическое устранение (вытравливание) не удаляет крупные заусенцы, а только сглаживает, то и электрохимическое (тот же реагент – кислота воздействует в гальванической ванне) добавит только проникновение на внутренние поверхности, но не улучшит результат;

– слесарная операция – зачистка шабером, бормашиной, абразивными кругами на резиновой связке – дополнительная ручная операция, дает хороший результат, повышенные трудоемкость и временные затраты;

– установка на станок стальных щеток – не все заусенцы зачищает, установка абразивных кругов на резиновой связке – круги разрушаются под воздействием смазочно-охлаждающей жидкости, установка керамических щеток – не опробовано;

– подбор режущего инструмента – опробован инструмент около 30 производителей, наилучший результат у швейцарских инструментов «UTILIS», «Fraisa».

На предприятии имеются три типа галтовочного оборудования:

– установка для центробежной галтовки MF 5-2 – роторная – используют для более грубой обработки среднегабаритных деталей;

– машина галтовочная барабанная реверсная – используют для галтовки малогабаритных деталей из материалов 29НК и бериллиевой бронзы;

– вибрационная галтовочная машина – не используют для обработки деталей коаксиальных радиокомпонентов для СВЧ-микроэлектроники.

Успешно удаляются заусенцы с наружных поверхностей деталей из материалов 29НК и бериллиевой бронзы при помощи галтовки, которая производится в галтовочной машине барабанного типа в 3 этапа:

– мокрое шлифование (грубое) керамическими призмами белыми GA – 10·10 (средняя агрессивность) в течение 1 ч;

– мокрая полировка (тонкая обработка) GA – 10·10 керамическая призма белая в течение одного часа;

– мокрое шлифование (финишная обработка – в сущности, тонкая полировка за счет круглой формы наполнителя) гранулами GA Ф 4 мм фарфора круглого в течение 1 ч.

На всех этапах используют шампунь Super Compound AL фирмы «OTEC» или шампунь Super Compound Fe этой же фирмы с антикоррозийными добавками.

Крупные наполнители размером 10·10 мм позволяют бережно выровнять поверхность, не повреждая ее, но не могут обработать пазы, карманы, боковые отверстия, канавки, резьбы и т.п.

Сложноудаляемые заусенцы на внутренних поверхностях удаляют тонким щабером, а при опасности повреждения поверхности детали обрабатывают маникюрными металлическими фрезами до выравнивания поверхности.

Не исследованы в условиях данного производства (применяемые на подобных разработках) такие методы устранения заусенцев как автоматизация слесарной операции – установка робота для зачистки [16–19], термическое удаление заусенцев [20, 21]. Малые размеры деталей обусловливают необходимость установки робота для зачистки на каждый станок для проведения обработки в рамках одной операции. Проведение экспериментального удаления заусенцев термическим способом или применением роботов для зачистки позволит оценить получаемое качество поверхности деталей. При получении удовлетворительных результатов эксперимента можно рекомендовать внедрение этих методов в производство, их применение позволит сократить время изготовления деталей, т.к. только на отделочно-абразивную обработку

в галтовочном барабане уходит 3 ч на каждую партию, а также снизить трудоемкость за счет исключения ручной слесарной операции по зачистке внутренних поверхностей.

Итак, качественное удаление заусенцев с деталей, имеющих труднодоступные поверхности, можно получить путем применения робота для зачистки, устанавливаемого на каждый станок, галтовки с последующей ручной слесарной операцией, термическим устранением заусенцев, а для материала 29НК – посменной заменой подобранного режущего инструмента для чистовой обработки. Применение роботов для зачистки и термическое устранение требуют дополнительных капиталовложений, целесообразность которых должна рассчитываться индивидуально и зависит от планируемых объемов выпуска продукции с их помощью. Галтовка с последующей зачисткой шабером вручную повышает трудоемкость и опасна срывом сроков изготовления. Посменная замена режущего инструмента значительно повышает расходы на инструмент. Возможно дальнейшее использование инструмента, отработавшего на материале 29НК до появления заусенцев, для производства деталей из других материалов. Для деталей, изготавливаемых из 29НК, целесообразно продолжить подбор инструмента, исследовать характер его износа, возможные способы снижения износа и восстановления приборов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наружный и внутренний проводники для СВЧ-электроники изготавливают преимущественно из сплава 29НК для герметичных соединителей и бериллиевой бронзы для негерметичных соединителей. Эти детали имеют требования высокой точности размеров (10–50 мкм) и чистоты поверхности – заусенцы не допускаются. Производство таких малогабаритных высокоточных изделий из труднообрабатываемых материалов требует применения особых технологий изготовления и соответствующего оборудования. Требуется оснащение производства высокоточными станками с ЧПУ, а также дополнительным оборудованием для устранения заусенцев. Для выбора дополнительного оборудования для устранения заусенцев и оценки эффективности его применения необходимо провести дополнительное исследование и провести эксперимент по удалению заусенцев термическим способом и использованием роботов для зачистки. При недостаточном оснащении производства оборудованием для устранения заусенцев возможно включение дополнительной обработки путем галтовки с последующей ручной зачисткой шабером. Посменная замена режущего инструмента значительно повышает себестоимость деталей, изготавливаемых из 29НК. Основные мероприятия по снижению расходов на инструмент – подбор инструмента, исследование характера его износа, возможных способов снижения износа и восстановления инструмента, применение алгоритмов подбора оптимальных маршрутов изготовления деталей на участке с возможностью комбинирования зачистки деталей, перерасхода инструмента без ручной зачистки и использования инструмента, отработавшего на 29НК для обработки других материалов.

Библиографический список

1. Джуринский К.Б. Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. Соединители, коаксиально-микрополосковые переходы, адаптеры, СВЧ-вводы, низкочастотные вводы, изоляционные стойки, фильтры помех. М.: Техносфера, 2006. 216 с.

2. Сторублев М.Л. Управление качеством электролитических процессов нанесения металлических покрытий // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: материалы I Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. (г. Курск, 22–23 мая 2009 г.). Курск: Изд-во КурскГТУ, 2009. Ч. 2. С. 85–88.

3. Тамаркин М.А., Колганова Е.Н., Федоров А.В. Исследование процесса удаления заусенца при вибрационной обработке деталей радиоэлектронной аппаратуры // Вестник современных технологий. 2019. № 3. С. 41–46.

4. Тамаркин М.А., Смоленцев Е.В., Колганова Е.Н.

Анализ современного состояния финишных методов обработки в среде свободных абразивов деталей, имеющих малые пазы и отверстия // Вестник Воронежского Государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 1. С. 122–129. https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.1.019

5. Kadivar M.A., Akbari J., Yousefi R., Rahi A., Nick M.G. Investigating the effects of vibration method on ultrasonic-assisted drilling of Al/SiCp metal matrix composites // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2014. Vol. 30. Issue 3. P. 344–350. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04155-6

6. Joon Kyu Beom, Young Gwan Kim, Kwang Joon Kim, Kwon Hee Kim. Study on the deburring of intersecting holes with abrasive flow machining // Journal of the Korean Society for Precision Engineering. 2019. Т. 36. № 2. С. 163–168. https://doi.org/10.7736/KSPE.2019.36.2.163

7. Гонибесова Е.В., Коротких М.Т. Электрохимическое удаление заусенцев с мелких деталей в условиях автоматизированного производства // Неделя науки СПбПУ. Лучшие доклады: материалы науч. конф. с междунар. участием (г. Санкт-Петербург, 13–19 ноября 2018 г.). Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2018. С. 106–110. https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/i18-186

8. Пермяков А.Г., Шастин В.И., Каргапольцев С.К., Лившиц А.В., Лгалов В.В. Удаление заусенцев с поверхности деталей коммутационного оборудования в высокоинтенсивном ультразвуковом поле // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. Т. 62. № 2. С. 33–40. https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.2(62).33–40

9. Bordones A.D., Leroux M., Kheyfets V.O., Yu-An Wu, Chia-Yuan Chen, Finol E.A. Computational Fluid Dynamics Modeling of the Human Pulmonary Arteries with Experimental Validation // Annals of Biomedical Engineering. 2018. Vol 46. Issue 9. P. 1309–1324. https://doi.org/10.1007%2Fs10439-018-2047-1

10. Kadivar MA, Akbari J, Yousefi R. Investigation of ultrasonic-assisted drilling of Al/SiCp metal matrix composite with Taguchi method. // Key engineering materials. 2012. Vol. 523–524. P. 215–219. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.215

11. Шастин В.И., Коновалов Н.П. Технологическое обеспечение процессов лазерного модифицирования поверхностей конструкционных сплавов. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 163 с.

12. Li Hongtao, Kan Jinfeng, Jiang Bailing, Liu Yanjie, Liu Zheng. Study of the Deburring Process for Low Carbon Steel by Plasma Electrolytic Oxidation // Plasma Science and Technology. 2016. Vol. 18. No. 8. P. 860–864. https://doi.org/10.1088/1009-0630/18/8/12

13. Valiev R.I., Khafizov A.A., Shakirov Y.I., Sushchikova A.N. Polishing and deburring of machine parts in plasma of glow discharge between solid and liquid electrodes // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2015. Vol. 86. P. 012026. [Электронный ресурс]. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/86/1/012026 (11.03.2019). https://doi.org/10.1088/1757-899X/86/1/012026

14. Сухинина Е.В., Ермаков М.А. Шастин В.И. Ультразвуковое кавитационное удаление заусенцев с поверхности малогабаритных деталей // Молодой ученый. 2018. № 9. С. 53–54. (In Russ.) https://doi.org/2072-0297.2018.9(195).53-54

15. Kwon Byeong Chan, Kim Kwon Hee, Ko Sung Lim. New abrasive deburring method using suction for micro burrs at intersecting holes // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2016. Vol. 65. Issue 1. P. 145–148. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.085

16. Sidorova A.V., Semyonov E.N., Belomestnykh A.S. Robotic edge machining using elastic abrasive tool // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2018. Vol. 327. P. 022097. https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022097

17. Чапышев А.П., Иванова А.В. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей с применением автоматических стационарных установок // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 1–5. С. 1627–1634. (In Russ.)

18. Ivanova A.V., Belomestnykh A.S., Semenov E.Yu., Ponomarev B.B. Manufacturing capability of the robotic complex machining edge details // International Journal of Engineering and Technology. 2015. Vol. 7. No. 5. P. 1774–1780.

19. Foit K., Gwiazda A., Banas W., Sekala A., Hryniewicz P. Object as a model of intelligent robot in the virtual workspace // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series: Modern Technologies in Industrial Engineering. 2015. Vol. 95. P. 012108. [Электронный ресурс]. URL: https:// iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/95/1/012108 (15.06.2019). https://doi.org/10.1088/1757-899X/95/1/012108

20. Чечета И.А., Зенин В.Л., Чечета А.Е. Изложен анализ производственных приемов для удаления заусенцев фронтом пламени и дано математическое описание основных параметров // Вестник Воронежского Государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 4. С.118–121.

21. Титов С.Н. Снятие заусенцев термоимпульсной установкой Pulsar TI-576 // Вестник научных конференций. 2016. № 12-4. С. 176–177. https://doi.org/10.17117/cn.2016.12.04

References

1. Dzhurinskii KB. Miniature coaxial radio components for SHF. Connectors, coaxial microstrip junctions, adapters, SHF inputs, low-frequency inputs, insulating racks, interference filters. Moscow: Tehnosfera; 2006, 216 p. (In Russ.)

2. Storublev ML. Quality management of metal coating

electrolytic processes. *Innovacii, kachestvo i servis v tekhnike i tekhnologiyah: materialy I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* = Innovations, quality and service in engineering and technology: Materials of the I International scientific and practical Conference. 22–23 May 2009, Kursk. Kursk: Kursk State technical University; 2009, part 2, p. 85–88. (In Russ.)
3. Tamarkin MA, Kolganova EN, Fedorov AV. Investigation of the process of removing a burr at vibration treatment of details of radio electronic equipment. *Vestnik sovremennyh tehnologii* = Journal of Modern Technologies. 2019;3:41–46. (In Russ.)
4. Tamarkin MA, Smolentsev EV, Kolganova EN. Analysis of the modern condition of deburing details having small grooves and holes in the media of free abrasives. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Bulletin of Voronezh state technical university. 2019;15(1): 122–129. (In Russ.) https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.1.019
5. Kadivar MA, Akbari J, Yousefi R, Rahi A, Nick MG. Investigating the effects of vibration method on ultrasonic-assisted drilling of Al/SiCp metal matrix composites. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2014;30(3):344–350. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04155-6
6. Joon Kyu Beom, Young Gwan Kim, Kwang Joon Kim, Kwon Hee Kim. Study on the deburring of intersecting holes with abrasive flow machining. Journal of the Korean Society for Precision Engineering. 2019;36(2):163–168. https://doi.org/10.7736/KSPE.2019.36.2.163
7. Gonibesova EV, Korotkih MT. Electrochemical deburring of small parts in automated production. In: *Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo politehnicheskogo universiteta. Luchshie doklady: materialy nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Week of Science SPbPU. The best reports: Proceedings of the scientific conference with international participation. 13–19 November 2018, Saint-Petersburg. Saint-Petersburg: Saint Petersburg Polytechnic University; 2018, p. 106–110. (In Russ.) https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/i18-186
8. Permyakov AG, Shastin VI, Kargapol'tsev SK, Livshits AV, Lgalov VV. Removal of burrs from the surface of parts of switching equipment in a high-intensity ultrasound field. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* = Modern Technologies. System analysis. Modeling. 2019; 62(2):33–40. (In Russ.) https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.2(62).33-40
9. Bordones AD, Leroux M, Kheyfets VO, Yu-An Wu, Chia-Yuan Chen, Finol EA. Computational Fluid Dynamics Modeling of the Human Pulmonary Arteries with Experimental Validation. Annals of Biomedical Engineering. 2018;46(9):1309–1324. https://doi.org/10.1007%2Fs10439-018-2047-1
10. Kadivar MA, Akbari J, Yousefi R. Investigation of ultrasonic-assisted drilling of Al/SiCp metal matrix composite with Taguchi method. Key engineering materials. 2012;523–524:215–219. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.215
11. Shastin VI, Konovalov NP. Technological support for processes of structural alloy surface laser modification. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2016, 164 p. (In Russ.)
12. Li Hongtao, Kan Jinfeng, Jiang Bailing, Liu Yanjie, Liu Zheng. Study of the De-burring Process for Low Carbon Steel by Plasma Electrolytic Oxidation. Plasma Science and Technology. 2016;18(8):860–864. https://doi.org/10.1088/1009-0630/18/8/12
13. Valiev RI, Khafizov AA, Shakirov YI, Sushchikova AN. Polishing and deburring of machine parts in plasma of glow discharge between solid and liquid electrodes. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series.* 2015, vol. 86, p. 012026. Available from: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/86/1/012026 [Accessed 11th March 2019]. https://doi.org/10.1088/1757-899X/86/1/012026
14. Sukhinina EV, Ermakov MA, Shastin VI. Ultrasonic cavitation deburring of small part surfaces. *Molodoi uchenyi* = Young scientist. 2018;9:53–54. (In Russ.) https://doi.org/2072-0297.2018.9(195).53-54
15. Kwon Byeong Chan, Kim Kwon Hee, Ko Sung Lim. New abrasive deburring method using suction for micro burrs at intersecting holes. CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2016;65(1):145–148. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.085
16. Sidorova AV, Semyonov EN, Belomestnykh AS. Robotic edge machining using elastic abrasive tool. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018, vol. 327, p. 022097. https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022097
17. Chapyshev AP, Ivanova AV. Technological capabilities of processes of mechanized finishing processing the details with the use of automatic stationary units. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj Akademii Nauk* = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2014;16(1–5):1627–1634. (In Russ.)
18. Ivanova AV, Belomestnykh AS, Semenov EYu, Ponomarev BB. Manufacturing capability of the robotic complex machining edge details. International Journal of Engineering and Technology. 2015;7(5):1774–1780.
19. Foit K, Gwiazda A, Banas W, Sekala A, Hryniewicz P. Object as a model of intelligent robot in the virtual workspace. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series: Modern Technologies in Industrial Engineering. 2015, vol. 95, p. 012108. Available from: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/95/1/012108 [Accessed 15th June 2019]. https://doi.org/10.1088/1757-899X/95/1/012108
20. Checheta IA, Zenin VL, Checheta AE. High effect machined methods for deburring by impact flame. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of Voronezh State Technical University. 2012;8(4):118–121. (In Russ.)
21. Titov SN. Deburring with a Pulsar TI-576 Thermal Pulse Unit. *Vestnik nauchnykh konferentsii* = Bulletin of Scientific Conferences. 2016;12-4:176–177. (In Russ.) https://doi.org/10.17117/cn.2016.12.04

Критерии авторства

Карлина Ю.И., Журавлев Д.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Authorship criteria

Karlina Y.I., Zhuravlev D.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Карлина Юлия Игоревна,
аспирант,
научный сотрудник,
Научно-исследовательская часть,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉ e-mail: karlinigor@mail.ru

Журавлев Диомид Алексеевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: dio@istu.irk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuliya I. Karlina,
Postgraduate Student,
Researcher of the Research Department,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: karlinigor@mail.ru

Diomid A. Zhuravlev,
Dr. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Mechanical Engineering Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: dio@istu.irk.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.923.9
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-36-51

Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости заготовок из сплавов порошкового молибдена

© В.А. Левко, Д.И. Савин, О.В. Литовка
Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия

Резюме: Цель – проанализировать контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости, выявить ряд общих явлений, характерных и для других методов обработки заготовок из сплавов порошкового молибдена, зафиксировать некоторые особенности этого процесса. Одной из проблем современного производства является механическая обработка деталей из труднообрабатываемых материалов, таких как сплавы молибдена. Для финишной обработки заготовок из молибденовых порошковых сплавов предложена обработка абразивным потоком высоковязкой рабочей средой. Для этого уточнена модель удаления материала единичным абразивным зерном. В этой модели абразивное зерно представляет собой многолезвийный инструмент, воздействующий на обрабатываемую поверхность как по фактической площади контакта, так и по контурной. Подтверждено, что появление составляющих силы резания, действующей на единичное абразивное зерно, обусловлено касательными и нормальными напряжениями потока рабочей средой. Проанализированы особенности контактных взаимодействий при обработке абразивным потоком заготовок из порошковых молибденовых сплавов. Для оценки исходного состояния поверхности перед финишной обработкой описан поверхностный слой заготовок из порошкового молибдена после токарной обработки и электроэрозионной вырезки проволокой с точки зрения исходного состояния. Обосновано проведение обработки абразивным потоком в два этапа с варьированием вида абразива и его зернистости. Экспериментально подтверждена возможность применимости обработки абразивным потоком высоковязкой средой для финишной обработки заготовок из порошкового молибдена. Выявлены особенности процесса обработки абразивным потоком с использованием рабочей среды высокой вязкости. Предложены рекомендации по использованию режимов обработки абразивным потоком для конкретных размеров отверстий в заготовках из порошкового молибдена.

Ключевые слова: обработка абразивным потоком, высоковязкая среда, сплав порошкового молибдена, контактное взаимодействие, шероховатость, абразивное зерно

Информация о статье: Дата поступления 25 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 26 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Левко В.А., Савин Д.И., Литовка О.В. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости заготовок из сплавов порошкового молибдена. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 1. С. 36–51. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-36-51

Powder molybdenum alloy workpieces contact interactions under abrasive flow machining by high viscosity media

Valery A. Levko, Dmitry I. Savin, Olga V. Litovka
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: The purpose of the article is to analyze contact interactions under abrasive flow machining by a high viscosity medium, to reveal a number of common phenomena characteristic of other processing methods of molybdenum powder alloy workpieces, to describe some features of the process. One of the problems of modern production is mechanical processing of parts made of hard-to-work materials, e.g. molybdenum alloys. The abrasive flow machining by a high viscosity medium is proposed for finish processing of workpieces made of molybdenum powder alloys. For this purpose the model of material removal by a single abrasive grain is refined. This model presents an abrasive grain as a multi-blade tool that impacts the treated surface both on the actual contact area and contour. It is proved that the origination of the components of the cutting force that impacts a single abrasive grain is due to tangential and normal stresses of the work-

ing medium flow. Analysis is given to the features of contact interactions taking place under abrasive flow processing of molybdenum powder alloy workpieces. To assess the initial state of the surface before finishing the surface layer of molybdenum powder workpieces is described after turning and EDM wire cutting in terms of the initial state. Justification is given to abrasive flow treatment in two stages with varying the type of abrasive and its grain size. Experiments proved the possibility of using an abrasive flow of high viscosity medium for finishing treatment of molybdenum powder workpieces. The features of the abrasive flow processing using a high viscosity working medium are revealed. The recommendations are given on the use of abrasive flow treatment modes for specific sizes of holes in molybdenum powder workpieces.

Keywords: abrasive flow machining, high viscosity medium, molybdenum powder alloy, contact interaction, roughness, abrasive grain

Information about the article: Received November 25, 2019; accepted for publication December 26, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Levko VA, Savin DI, Litovka OV. Powder molybdenum alloy workpieces contact interactions under abrasive flow machining by high viscosity media. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):36–51. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-36-51

1. ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие производства авиационной и ракетно-космической техники потребовало появления новых материалов, способных не терять свои эксплуатационные свойства при высоких температурах, близких к их температурам плавления, быть стойкими к различным агрессивным средам, а также обладать высокой износостойкостью. Основу таких материалов составили сплавы титана, кобальта, хрома и молибдена. Высокие эксплуатационные свойства таких сплавов обусловливают их низкую обрабатываемость резанием из-за особых характеристик, таких как низкая теплопроводность, высокая прочность при повышенных температурах, износостойкость и т.д. Кроме того, их высокая прочность, ударная вязкость, износостойкость и низкая теплопроводность приводят к быстрому износу металлорежущего инструмента и сокращению срока его службы [1].

Из-за высокой прочности при повышенных температурах таких сплавов нагрев материала, возникающий при обработке, слабо влияет на улучшение их обрабатываемости. Высокая динамическая прочность на сдвиг подобных материалов ведет к накапливанию напряжений кристаллической решетки с дальнейшим образованием сколов. Низкая теплопроводность препятствует эффективному отводу тепла из зоны резания с последующей локализацией температуры резания на режущей кромке инструмента. Низкая теплопроводность и высокий коэффициент трения при контактных взаимодействиях кромки режущего инструмента и обрабатываемой поверхности в условиях повышенных температур ведут к налипанию частичек материала к острию инструмента. Постепенное налипание частичек ведет к образованию нароста на режущей кромке, что ускоряет скорость износа [2]. Из-за присутствия легирующих элементов в микроструктуре рассматриваемых сплавов они содержат абразивные частицы, что также ведет к дополнительному износу режущего инструмента [1]. Кроме того, такие твердые частицы не способны пластически деформироваться во время механической обработки и выкрашиваются с поверхности заготовки, оставляя за собой дефект поверхности. Далее в ходе процесса обработки эта частица в виде стружки с высокой вероятностью налипает либо на обрабатываемую поверхность, нарушая ее целостность, либо на режущую кромку инструмента [3].

Исследования микрофрезерования наружной поверхности чистого молибдена позволили установить такие параметры обработки, при которых получено высокое качество поверхности *Ra*=0,25 мкм. При этом выявлено налипание микрочастиц молибдена на режущую кромку фрезы. Из рентгеноструктурного анализа образца с лучшими результатами обработки установлено, что значение остаточного напряже-

ния σ_θ = - 012 ± 0,02 ГПа, т.е. процесс обработки, привел к сжатию материала чистого молибдена [4].

Сплавы из порошкового молибдена, имея свойства обычного молибдена, отличаются некоторыми характеристиками. Ключевые особенности данных сплавов – более высокая механическая прочность (износостойкость) и твердость при высоких температурах [5].

Сравнение характеристик сплава из порошкового молибдена SinteredMo, углеродистой стали AISI 1045 (Ck45) и хромоникелевого сплава Inconel 718, показывает, что сплавы из порошкового молибдена обладают более высокой плотностью 10,28 г/см^3, температурой плавления 2620ºС, величиной модуля Юнга 800–1200 ГПа, относительным удлинением <30% и высокой теплопроводностью 140 Вт/(м·К). В тоже время у этого сплава существенно ниже коэффициент линейного теплового расширения – 5,2 10^{-6}·К$^{-1}$, удельная теплоемкость 254 Дж/(кг·К) [5].

Опыт экспериментальной токарной обработки порошкового молибдена различными резцами без применения смазывающе-охлаждающих жидкостей показал, что этот вид обработки позволил получить шероховатость поверхности до *Ra*=1,45 мкм. Установлен больший эквивалентный коэффициент трения, по сравнению с обычными углеродистыми сталями, а также повышенная склонность к адгезии и пластическому оттеснению при контактных взаимодействиях режущей кромки и стружки. При этом силы резания в целом были немного выше и находились под сильным влиянием нормального переднего угла. Выявлено, что доминирующим механизмом износа всех видов инструмента было окисление режущей кромки, а максимальную стойкость кромки (32 мин при скорости резания 215 м/мин) обеспечили сочетание увеличенной положительной геометрии (угла резания) и полировка поверхности кромки [5].

При исследовании особенности процесса стружкообразования при токарной обработке наружной поверхности образцов из молибденового сплава установлено наличие сжимающих тангенциальных остаточных напряжений. Молибденовый сплав в процессе стружкообразования ведет себя как пластичный материал, а при формировании поверхностного слоя – как материал пониженной пластичности [6].

Для ряда заготовок из молибденовых сплавов целесообразно применение дополнительной финишной обработки их внутренних поверхностей. Поскольку такая обработка имеет дополнительные сложности, связанные с затрудненным доступом лезвийного инструмента и его быстрым износом, для этих целей все большее применение получают нетрадиционные методы финишной обработки. В качестве инструмента в этих методах применяется поток разнообразных жидкостных или уплотненных сред, несущих рабочие элементы, которые при перемещении вдоль обрабатываемой поверхности вступают в контакт с ее неровностями [7].

Так, в производстве полупроводниковой техники применяют способ финишной обработки абразивными зернами, прокачиваемыми в коллоидной жидкости. Эта жидкость представляет собой кислую водную среду (pH от 3 до 6), содержащую водорастворимый поверхностно-активный материал и окислитель (перекись водорода) [8]. В этом решении механизм удаления материала можно классифицировать как разновидность комбинированной струйной абразивно-жидкостной обработки. Поток рабочей среды представляет собой низковязкую среду, способную к проявлению при течении в обрабатываемом канале лишь небольших упругих деформаций. Производительность обработки и величина шероховатости обработанной поверхности при этом не удовлетворяют требованиям современного производства.

Анализ публикаций показал, что отсутствует опыт применения обработки абразивным потоком деталей из молибденовых сплавов. Целью данного исследования является обоснование применения способа обработки абразивным потоком высоковязкими рабочими средами для повышения

производительности финишной обработки и снижения шероховатости внутренних поверхностей деталей из молибденовых порошковых сплавов.

2. КОНТАКТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ

Основу рассматриваемого метода положил способ экструзионного хонингования или абразивной обработки внутренней поверхности, заключающийся в сжимающем давлении на обрабатываемую поверхность при абразивном контакте с ней полутвердого, труднотекучего полимерного материала. Этот материал состоит из силиконовой среды, наполненной мелкодисперсными абразивными частицами. Среда под давлением становится текучим, почти твердым сгустком, образуя прочную матрицу. При течении поток рабочей среды удерживает под давлением полимерный материал в ограниченном абразивном контакте с обрабатываемой поверхностью [9].

Описанию контактных взаимодействий при обработке абразивным потоком посвящен ряд работ. Экспериментальное исследование сил резания и абразивной способности зерна во время обработки абразивным потоком позволило установить, что давление экструзии, концентрация абразива и размер зерна влияют на силы резания, абразивную способность и, наконец, на уменьшение шероховатости поверхности. При этом основным механизмом удаления материала являются трение и пластическое оттеснение [10].

Аналогичный вывод был сделан в ходе теоретических расчетов сил, возникающих при деформации материала при обработке абразивным потоком. Теоретические расчеты подтверждены экспериментальными исследованиями обработки мягкой стали и алюминиевого сплава [11]. Следует отметить, что результаты исследований [10, 11] получены обработкой абразивным потоком заготовок средой низкой и средней вязкости. Давление экструзии при этом варьировалось в диапазоне от 2 МПа до 8 МПа.

В работе исследователей из Индии приведен критический анализ современного состояния процесса обработки (отделки) абразивным потоком [12]. Отмечено, что обработка абразивным потоком может быть использована для финишной обработки различных материалов. С ее помощью обеспечивается надежная, равномерная, повторяемая и точная отделка поверхности с удалением очень небольшого слоя материала.

Пластичность и твердость обрабатываемой детали оказывают большое влияние на процесс обработки абразивным потоком. Рабочая среда должна быть самодеформируемой, вязкоупругой и неньютоновской жидкостью с очень высоким коэффициентом восстановления. Более высокая вязкость среды увеличивает закрепленность абразивных частиц в полимере, что увеличивает производительность обработки. Однако приведенные в данной работе зависимости производительности съема материала и шероховатости поверхности носят эмпирический характер либо основаны на формальной интерпретации геометрических характеристик абразивных зерен и микронеровностей обрабатываемой поверхности [12].

В другой работе приведена схема (рис. 1), иллюстрирующая механизм удаления материала заготовки во время обработки абразивным потоком [13]. Предложенная иллюстрация процесса является упрощенной как с точки зрения структуры поверхности, так и учета соотношения размеров шероховатости (микронеровности) заготовки и абразивных зерен.

Таким образом, максимальная исходная шероховатость поверхности после получения заготовок составляет Ra = 80 – 40 мкм. Как правило, перед операциями финишной обработки шероховатость поверхности варьируется в пределах Ra = 2,5 – 1,25 мкм. Размер абразивных зерен, применяемых в обработке абразивным потоком, колеблется в пределах от 40 мкм (завершающая стадия обработки) до 500 мкм (начальная стадия обработки). Размер аб-

разивных зерен имеет прямую зависимость от величины исходной шероховатости заготовки, твердости обрабатываемого материала и вязкости рабочей среды.

Более точная схема была предложена при разработке расчетной модели удаления материала при обработке абразивным потоком [14]. В ней обобщен опыт предыдущих разработок и предложена схема приложения сил на единичное абразивное зерно, а также принципиальная схема удаления материала модели единичным абразивом (рис. 2).

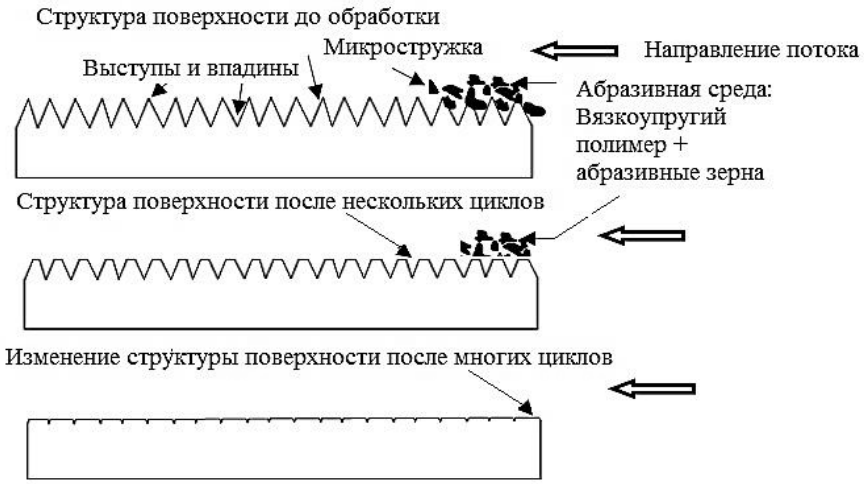


Рис. 1. Механизм удаления материала в процессе обработки абразивным потоком [13]
Fig. 1. Mechanism of material removal under abrasive flow machining [13]

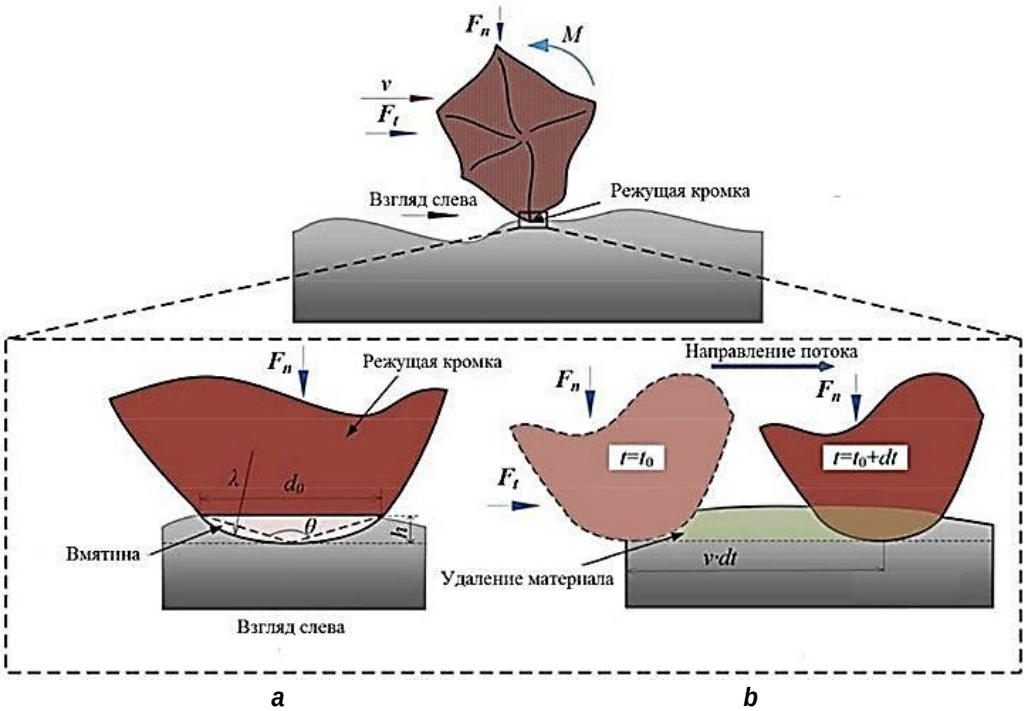


Рис. 2. Принципиальная схема модели удаления материала единичным абразивным зерном: a– вдавливание в заготовку под действием нормальной составляющей силы резания (Fn); b – удаление материала единичным абразивным зерном [14]
Fig. 2. Schematic diagram of the material removal model by a single abrasive grain: a – indentation into a workpiece under the action of a normal component of the cutting force (Fn); b – material removal by a single abrasive grain [14]

ISSN 1814-3520

Под действием нормальной F_n и тангенциальной F_t составляющих сил резания, возникающих при движении в потоке среды единичного абразивного зерна со скоростью v, это зерно вступает в контакт с неровностью заготовки. Под действием нормальной составляющей F_n абразивное зерно внедряется в заготовку на глубину h, образуя вмятину длиной d_0. Размер вмятины также зависит от радиуса вершины кромки зерна λ и максимального угла θ между двумя линиями, соединяющих нижнюю точку вмятины и две точки на верхней кромке вмятины. В начальное время $t = t_0$ происходит контакт выступа зерна и неровности заготовки с проявлением момента сил M. За счет F_t абразивное зерно перемещается в направлении потока среды. Длина контакта определяется как производная скорости абразивного зерна по времени dt [14].

Для анализа контактных взаимодействий при обработке абразивным потоком деталей из сплавов порошкового молибдена рассмотренная принципиальная схема (см. рис. 2) требует уточнения.

Первое уточнение связано с масштабным коэффициентом, так как контакт «микронеровность заготовки – абразивное зерно» происходит как на уровне абразивного зерна в целом, так и ее отдельных микровыступов (режущих кромок).

Второе уточнение обусловлено вязкостью рабочей среды. Экспериментальное исследование процесса обработки абразивным потоком высокой вязкости установило, что сила резания единичным абразивным зерном, определяемая как сумма радиальной и тангенциальной (осевой) составляющих, наиболее чувствительна к изменению величины давления экструзии. При этом увеличение, как вязкости рабочей среды и давления экструзии, положительно влияет на радиальную составляющую силы резания, но отрицательно – на тангенциальную (осевую) составляющую силы резания единичным зерном [15]. Этот факт влияет на величину и направление результирующей силы резания.

Третье уточнение требует учитывать вид абразивного зерна и его зернистость. Исследования поверхности абразивных зерен после взаимодействия с молибденом в условиях микроцарапания показали, что зерна корунда и карбида кремния при микроцарапании молибдена изнашиваются в результате истирания и микроскалывания [16]. Молибден переносится на поверхность площадки износа корунда, как и на поверхность карбида кремния, и концентрируется вблизи трещин и других дефектов, образующихся на поверхности корунда. При этом корунд после взаимодействия с молибденом подвергается большей модификации по сравнению с карбидом кремния, что отражается в развитости поверхности площадки износа (сочетание рисок и элементов микровыкрашивания) [16].

Четвертое уточнение вызвано структурой материала деталей из порошкового молибдена. Сплав порошкового молибдена М-МП должен содержать не менее 92% зерен размером до 5 мкм[1]. Такая структура оказывает сильное влияние на процесс обработки. Данный сплав имеет плотность 10,2 г/см^3, температуру плавления 2610ºС, теплопроводность 142 Вт/(м·К), удельную теплоемкость 0,256 Дж/(кг·К) и коэффициент линейного теплового расширения 4,9 10^{-6}·К$^{-1}$. Твердость сплава порошкового молибдена М-МП по Бринеллю – 125 НВ, а величина модуля Юнга – 336,6 ГПа[1].

Два первых уточнения схемы контакта являются универсальными относительно любого вида материала при обработке абразивным потоком. Третье и четвертое уточнения отражают специфику контактных взаимодействий при обработке деталей из молибденовых сплавов.

При обработке абразивным потоком единичное абразивное зерно вступает в контакт с поверхностью детали. При этом образуется контурная площадь касания A_c, на которой возникает контурное давление равное отношению силы, действующей на

[1]ГОСТ 17432-72. Материалы порошковые. Прутки и поковки из сплава марки М-МП. Технические условия. Введ. 01.01.1974. М.: Изд-во стандартов, 1992.

контактирующие тела, к контурной площади касания $p_c = N / A_c$. Масштабный коэффициент абразивного зерна и шероховатости поверхности (рис. 3) демонстрирует, что из-за больших размеров абразивное зерно одновременно находится в контакте с целым рядом микронеровностей. При этом на каждой микронеровности образуется элементарная фактическая площадь касания A_{ri}. Суммарная площадь контактных зон микронеровностей абразивного зерна и обрабатываемой поверхности образует фактическую площадь касания [17].

Абразивное зерно в пределах контурной площади касания воздействует на все единичные микронеровности обрабатываемой поверхности в целом, а также на каждую единичную микронеровность отдельным выступом, представляющим собой режущую кромку. Угол таких кромок зависит от вида и величины абразивного зерна.

Вид контакта определяется отношением величины сближения контактирующих тел h и радиуса скругления вершины микронеровности R.

Известные из трибологии условия перехода с одного вида контакта на другой предложены для оценки вида контакта при обработке абразивным потоком формулы (1)–(4) [17].

Упругий контакт:

$$\frac{h}{R} < 0,01. \quad (1)$$

Упруго-пластический контакт:

$$\frac{h}{R} \geq 2,4(1-\mu^2)^2\left(\frac{HB}{E}\right)^2. \quad (2)$$

Пластический ненасыщенный:

$$\frac{h}{R} \geq 5,4(1-\mu^2)^2\left(\frac{HB}{E}\right)^2. \quad (3)$$

Микрорезание:

$$\frac{h}{R} \geq 14,5(1-\mu^2)^2\left(\frac{HB}{E}\right)^2. \quad (4)$$

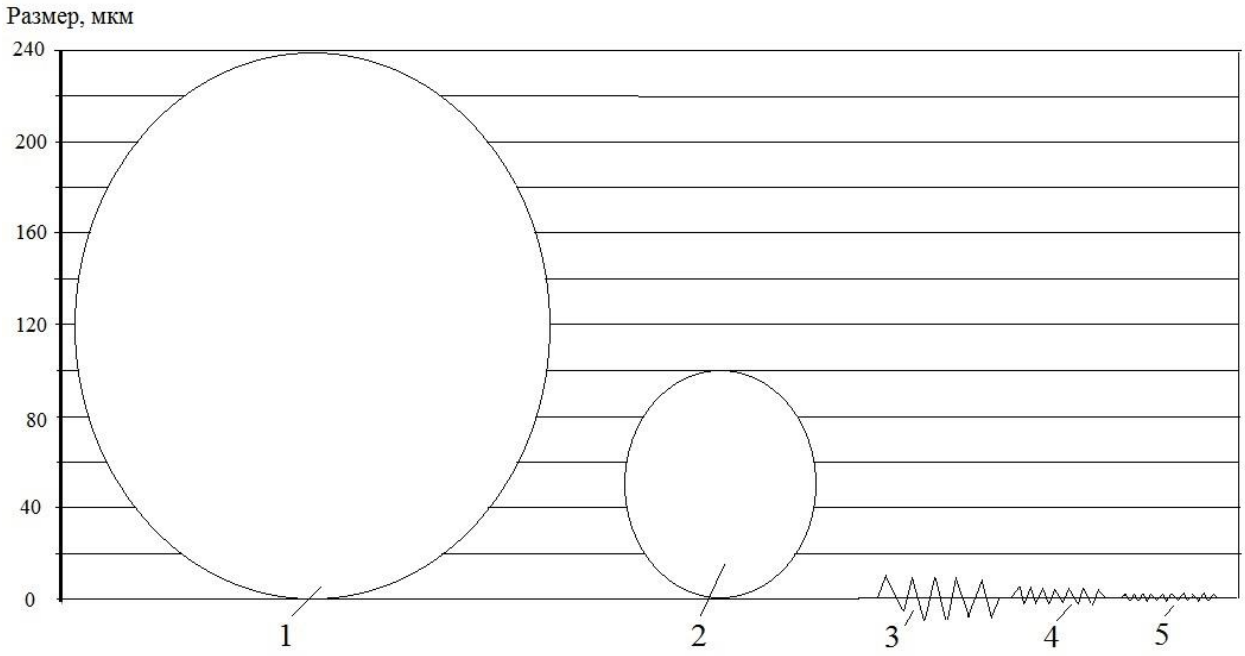


Рис. 3. Масштабный коэффициент абразивного зерна и шероховатости поверхности: 1 – зерно размером 240 мкм; 2 – зерно размером 100 мкм; 3 – шероховатость Ra = 10 мкм; 4 – шероховатость Ra = 5 мкм; 5 – шероховатость Ra = 2,5 мкм

Fig. 3. Scale coefficient of an abrasive grain and surface roughness: 1 – grain of the size of 240 μm; 2 – grain of the size of 100 μm; 3 – roughness Ra = 10 μm; 4 – roughness Ra = 5 μm; 5 – roughness Ra = 2.5 μm

В рассмотренной выше принципиальной схеме модели удаления материала единичным абразивным зерном (см. рис. 2), зерно в контакте имеет одну режущую кромку. В действительности абразивное зерно представляет собой многолезвийный инструмент, воздействующий на обрабатываемую поверхность как по фактической площади контакта (режущими кромками), так и по контурной площади контакта (зерно в целом).

Второе уточнение расчетной схемы необходимо для расчета нормальной F_n и тангенциальной F_t составляющих силы резания. На основании обобщенной модели Максвелла было проведено моделирование потока среды при обработке абразивным потоком путем решения стационарных неупругих уравнений Навье-Стокса [18]. Авторами этой работы отмечены сложность решаемой задачи и необходимость дальнейшего совершенствования данной модели из-за существенного расхождения расчетных и экспериментальных скоростей и давлений потока рабочей среды.

Применение неупругих уравнений Навье-Стокса для неньютоновских сред дает удовлетворительные результаты при моделировании обработки абразивным потоком рабочими средами малой вязкости [19, 20]. Модель течения в этом случае построена на перепаде давления в обрабатываемой детали, а рабочая среда подается с постоянным расходом из накопительной емкости.

Анализ ряда работ [21, 22], направленных на разработку теоретических моделей расчета нормального давления на внутренней поверхности круглой трубы и скорости скольжения стенки при обработке абразивным потоком, в случае применения высоковязких рабочих сред дает серьезные расхождения с экспериментальными наблюдениями. В этом случае в процессе обработки участвует весь объем рабочей среды 4, продавливаемый штоками рабочих цилиндров 1 установки через обрабатываемую деталь 3, закрепленную в приспособлении 2 (рис. 4).

В начале обработки, когда объем абразивной среды в рабочем цилиндре находится в недеформируемом состоянии, расположение абразивных зерен носит случайный характер. При приложении давления шток начинает воздействовать на рабочую среду. Волна напряжения в вязкоупругой среде начинает передаваться в направлении от штока к свободному краю среды. При достижении определенной величины напряжения сдвига τ_0 среда начинает течение сдвига. При этом формируется поток с определенной внутренней струк-

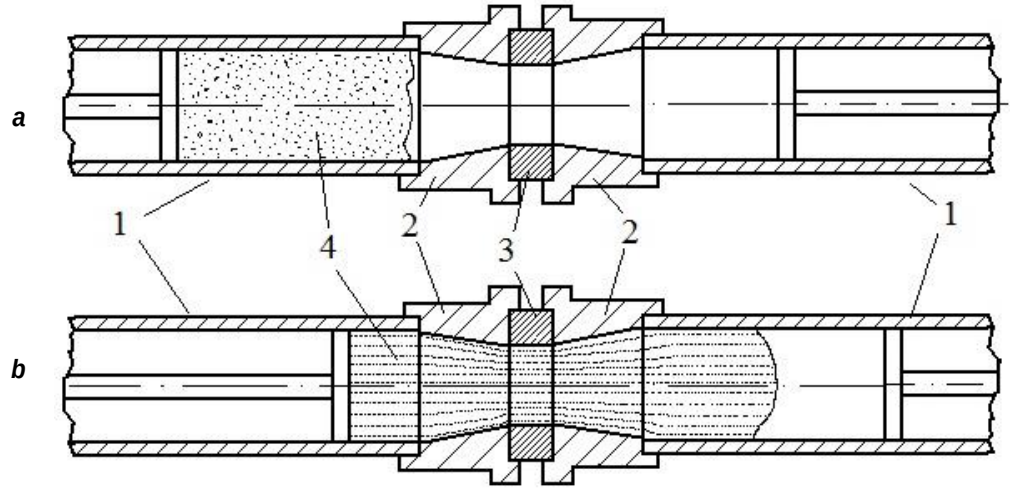


Рис. 4. Схема обработки абразивным потоком средой высокой вязкости: a – в начале обработки; b – в процессе обработки абразивным потоком
Fig. 4. Diagram of abrasive flow machining by high viscosity media: a – at the beginning of processing; b – during abrasive flow machining

турой, характеризующейся возникновением линий тока. В каждой линии тока абразивные зерна выстраиваются в определенной последовательности, образуя силовые цепочки. Формирование таких цепочек на поверхности трения при абразивной обработке в целом описано в работе, посвященной моделированию характеристик силовых цепей на основе метода дискретных элементов [23].

Проведенные ранее визуальные исследования данного процесса обработки позволили установить, что при обработке в потоке рабочей среды отдельные абразивные зерна перемещаются по линиям тока. При этом наблюдался эффект образования силовых абразивных цепочек [24], тем самым экспериментально подтверждая ранее выдвинутое предположение об образовании таких цепочек при обработке абразивным потоком [25]. Таким образом, появление составляющих силы резания, действующей на единичное абразивное зерно, обусловлено касательными и нормальными напряжениями потока рабочей среды.

Для определения величины составляющих сил резания предложено привести к площади поперечного сечения единичного зерна касательные и нормальные напряжения [26]:

$$F_n = \sigma S_{аз} \text{ и } F_t = \tau S_{аз}, \qquad (5)$$

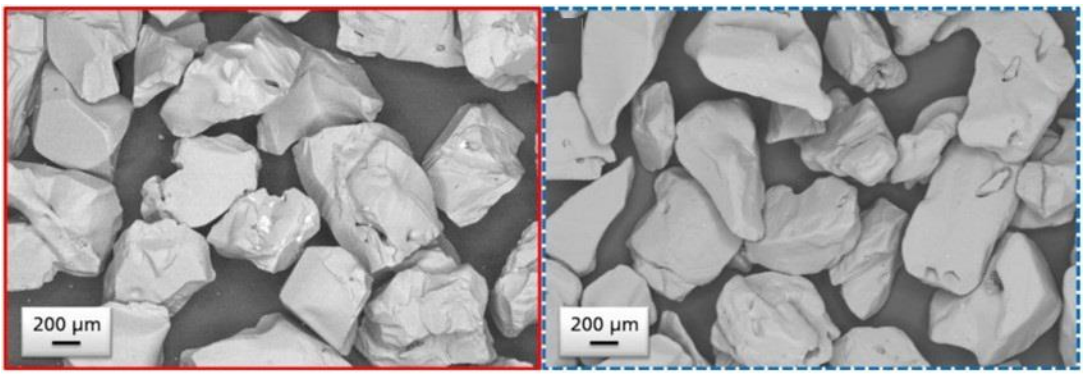
где $S_{аз}$ – площадь поперечного сечения абразивного зерна, м^2; σ – нормальные напряжения, Па; τ – касательные напряжения, Па.

Численные значения напряжений в потоке высоковязкой среды могут достигать величин порядка $3 \cdot 10^5$ Па. При этом сам поток перемещается с небольшой скоростью.

Единичное абразивное зерно при обработке абразивным потоком представляет собой многогранный керамический инструмент. При его контакте с микронеровностями обрабатываемой поверхности могут возникать различные виды контакта. Вид контакта зависит от твердости и шероховатости обрабатываемой поверхности и абразивного зерна. Как правило, на уровне микровыступов зерна происходят микрорезание и пластическое оттеснение, а на уровне абразивного зерна – упругая и пластическая деформации.

В процессе контакта абразивные зерна могут раскрашиваться, а их режущие кромки затупляться. Это предположение подтверждено экспериментально при исследовании износа абразивных сред и его влияния на результаты обработки абразивным потоком (рис. 5) [27].

В ходе многократной экструзии рабочей среды при обработке абразивные зерна могут перемещаться не только в осевом направлении вдоль обрабатываемой



a *b*

Рис. 5. Изображение абразивных частиц размером > 200 мкм под электронным микроскопом: a – до обработки; b – после обработки абразивным потоком [27]
Fig. 5. Image of abrasive particles of the size> 200 µm under an electron microscope: a – before machining; b – after abrasive flow machining [27]

поверхности, но и при определенных условиях в радиальном направлении. При этом зерна, вступавшие в контакт с поверхностью, становятся неактивными, а на их место смещаются зерна из центральной части потока.

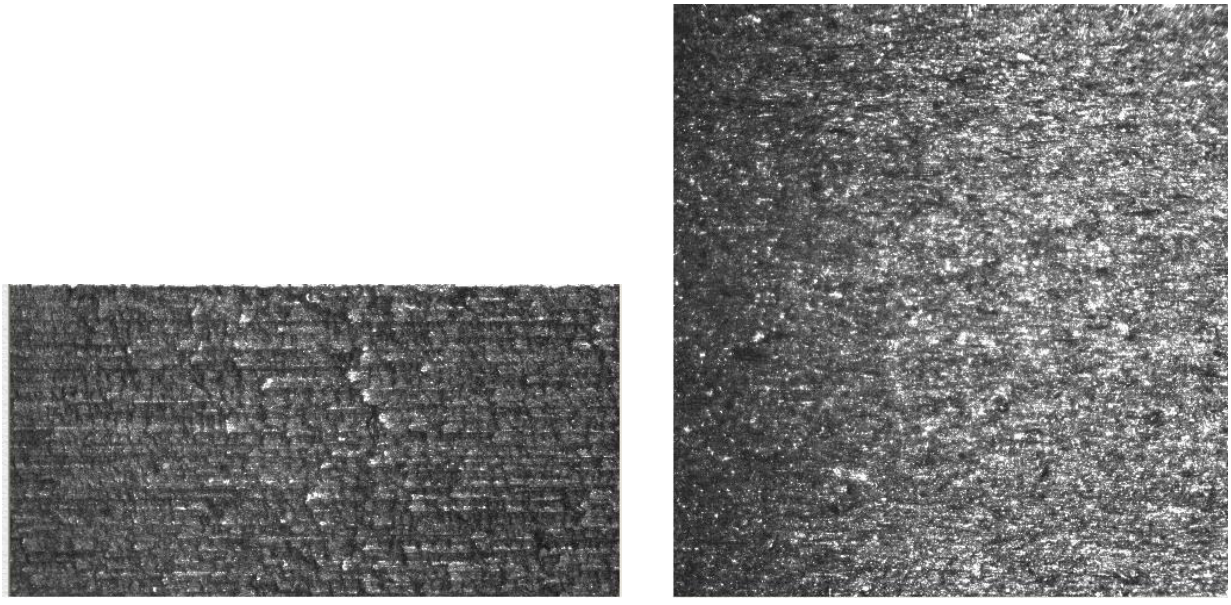
3. ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ МОЛИБДЕНОВЫХ СПЛАВОВ

Состояние поверхностного слоя заготовки из порошкового молибдена определяется размером частиц порошка молибдена (диаметр до 5 мкм) и видом предшествующей обработки. Таким образом, при токарной обработке заготовки из молибденового сплава марки М-МП получена шероховатость поверхности *Ra* = 1,6 мкм (рис. 6 *a*).

Полученная поверхность представляет собой сочетание рисок и выступов, сориентированных в направлении движения резца. Структура рисок и выступов характерна для контакта при токарной обработке с резанием материала на уровне кромки резца в целом, и выкрашивания частиц порошкового молибдена на микроуровне. На поверхности рисок и выступов виден комплекс круглых микронеровностей, образованных спеченными и спрессованными частичками порошка молибдена.

Аналогичные микронеровности, образованные частичками порошка молибдена, видны и на поверхности полученной электроэрозионной вырезки проволокой (рис. 6 *b*). При этом риски и выступы имеют сглаженную форму со следами оплавления. Шероховатость поверхности после электроэрозионной вырезки проволокой составляет *Ra* = 1,6 мкм.

Зарубежный опыт механической обработки молибдена показывает, что для заготовок из обычного молибдена можно обеспечить шероховатость до *Ra* = 0,25 мкм [4]. Для заготовок из порошкового молибдена эта величина значительно больше – *Ra* = 1,45 мкм [5]. Пониженная пластичность молибдена при формировании его поверхностного слоя, отмеченная как особенность процесса стружкообразования при резании молибденового сплава [6], обусловлена особенностью контактных взаимодействий.



a *b*

Рис. 6. Поверхность заготовки из порошкового молибденового сплава: a – после токарной обработки; b – после электроэрозионной вырезки проволокой
Fig. 6. Surface of the workpiece made of molybdenum powder alloy: a – after turning; b – after EDM wire cutting

Они основаны на выкрашивании частиц порошкового молибдена из основного слоя заготовки по границам их раздела. Минимальный размер отделяемой стружки при этом составляет размер частицы порошка.

Установлено, что при обработке абразивным потоком отделяемые частицы порошкового молибдена удаляются из зоны обработки, попадая либо в полимерную основу рабочей среды либо налипая на одну из кромок абразивного зерна. На контурной площади контакта единичного абразивного зерна возникают, как правило, упругие деформации. На фактической площади контакта отдельные микронеровности поверхности испытывают пластические деформации, а на уровне микровыступов единичного зерна возникают условия и для выкрашивания частиц молибдена.

Исходя из этих особенностей контакта, в два этапа проведена обработка абразивным потоком заготовки из порошкового молибденового сплава М-МП. Исходное состояние поверхности после электроэрозионной вырезки проволокой (рис. 6 *b*) имеет шероховатость *Ra* = 1,6 мкм.

Задачей первого этапа являлось удаление с поверхности дефектного слоя, полученного предыдущей обработкой, и подготовка поверхности под финишную обработку. Структура дефектного слоя, который необходимо удалить или уменьшить, описана выше. Выступы, по сравнению с основным материалом, имеют меньшую стойкость к абразивному воздействию. Следовательно, при обработке на первом этапе возможно создание большего количества площадок фактического контакта «абразивное зерно – молибден». Возрастание количества площадок фактического контакта ведет не только к уменьшению размеров выступов, но и к образованию большего количества новых микронеровностей. Эти микронеровности имеют меньший радиус скругления. При этом прочностные свойства становятся выше, но они все остаются меньшими по сравнению с основным материалом.

Для обработки на первом этапе применен нормальный электрокорунд с большей зернистостью. Зерна электрокорунда, по сравнению с карбидом кремния, характеризуются большим количеством микровыступов с острыми кромками, а также большей склонностью к скалыванию этих микровыступов. Общая теория абразивной обработки говорит о том, что при каждом контакте происходит истирание кромки абразива, ведущей к увеличению ее режущего угла. Скалывание микровыступов, принявших участие в контакте, располагает к образованию новых острых граней, а также удалению налипших частичек молибдена. На этом этапе основным механизмом удаления материала является выкрашивание частичек молибдена поверхностного слоя. При этом происходит незначительное пластическое деформирование.

В результате обработки абразивным потоком высоковязкой средой на основе синтетического термостойкого высокомолекулярного каучука СКТ с добавлением электрокорунда нормального зернистостью F40 и давлением экструзии 12 МПа удалось получить шероховатость поверхности *Ra* = 1,45–1,5 мкм. Обработка зернами нормального электрокорунда большой зернистостью позволила образовать большее, по сравнению с исходной поверхностью, количество потенциальных площадок фактического контакта, приходящихся на контурную площадь контакта.

Задачей второго этапа являлось формирование поверхностного слоя, образованного радиусами скругления частичек порошка молибдена. Так как площадок фактического контакта, приходящихся на номинальную контурную площадь контакта, стало больше, зернистость абразива можно уменьшить, а его микротвердость и абразивную способность взять большими по величине. По отношению к электрокорунду таким абразивом является карбид кремния.

Поскольку высота неровностей поверхности уменьшилось, а их количество возросло, условия контактных взаимодействий на втором этапе изменились. Микровыступы зерна карбида кремния имеют больший радиус. Они более стойкие к ска-

лыванию. В связи с этим наряду с выкрашиванием в формировании поверхности большую роль начинает играть и пластическая деформация.

Для обработки абразивным потоком на втором этапе использована высоковязкая рабочая среда, в которой использованы зерна карбида кремния зернистостью F8. Величина давления экструзии – 12 МПа. Получена шероховатость поверхности заготовки *Ra* = 1,3–1,4 мкм (рис. 7). Ее текстура характеризуется отсутствием выступов и рисок, чьи размеры были бы значительно больше средней шероховатости.

Результаты обработки подтверждают применимость технологии обработки абразивным потоком заготовок из порошкового молибдена.

Обработку абразивным потоком средой высокой вязкости можно применять для финишной обработки заготовок для дюз и сопел. Дюзы из порошкового молибдена применяются в электронно-лучевых установках для распыления газов и жидкостей, в промышленных агрегатах – для напыления тонких металлических пленок. Подобные дюзы входят в конструкции краскопультов и покрасочных машин, а также применяются на стекольных производствах для выдувки различных изделий.

В зависимости от типа дюзы диаметр ее отверстия или отверстий может варьироваться в диапазоне от 3 до 25 мм, длина отверстий – от 20 до 70 мм. Подобные размеры отверстий позволяют проводить обработку на установках с диаметром рабочих цилиндров до 25 мм. Объем применяемой для обработки рабочей среды высокой вязкости при этом составляет $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ м^3. В связи с высокой вязкостью рабочей среды давление экструзии рабочих цилиндров рекомендуется устанавливать на максимальных значениях – 12 МПа. Другие рекомендации по использованию режимов обработки абразивным потоком для конкретных размеров отверстий в заготовках из порошкового молибдена приведены в таблице.

При изменении формы или площади сечения обрабатываемого отверстия абразивный поток перестраивает свой профиль соответствующим образом. Поэтому, если в конструкторской документации на изделие запрещается наличие фасок на входе и выходе отверстия, рекомендуется использование дополнительных вкладышей с отверстием. С одной стороны отверстие вкладыша имеет одинаковые параметры с отверстием обрабатываемой заготовки и плотно прижимается к нему во время монтажа приспособления. С другой стороны вкладыша отверстие может быть большего диаметра. Профиль абразивного потока, необходимый для обработки отверстия заготовки, формируется на входе в отверстие вкладыша, образуя там фаску.



Рис. 7. Поверхность детали из порошкового молибденового сплава после обработки абразивным потоком
Fig. 7. Surface of the workpiece made of molybdenum powder alloy after abrasive flow machining

Рекомендации по использованию режимов обработки абразивным потоком для конкретных размеров отверстий в заготовках из порошкового молибдена
Recommendations on the use of abrasive flow machining for specific hole sizes in workpieces from molybdenum powder alloy

Диаметр отверстия, мм	Этап обработки	Абразив	Количество абразива, %	Количество цикловобработки	Шероховатость *Ra*, мкм	
					до	после
до 15	первый	нормальный электрокорунд F40	40	40	1,6	1,45–1,5
до 15	второй	карбид кремния F8	40	35	1,45–1,5	1,3–1,4
от 15 до 25	первый	нормальный электрокорунд F40	50	40	1,6	1,45–1,5
от 15 до 25	второй	карбид кремния F8	50	35	1,45–1,5	1,3–1,4
свыше 25	первый	нормальный электрокорунд F40	60	40	1,6	1,45–1,5
свыше 25	второй	карбид кремния F8	60	35	1,45–1,5	1,3–1,4

Аналогично профиль абразивного потока меняется и на выходе обрабатываемого отверстия, образуя фаску и на этой кромке. Применение дополнительного вкладыша на выходе обрабатываемого отверстия заготовки позволяет исключить образование нежелательной фаски.

Если в конструкции заготовки имеется несколько отверстий, то и дополнительные вкладыши должны иметь такое же количество отверстий, совпадающих по своим характеристикам с обрабатываемыми отверстиями.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ контактных взаимодействий при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости выявил ряд общих явлений, характерных и для других методов обработки заготовок из сплавов порошкового молибдена, и некоторые особенности этого процесса.

К основным особенностям процесса обработки абразивным потоком рабочей среды высокой вязкости стоит отнести:

– отвод рабочей средой отделяемых частиц молибдена из зоны обработки;

– самозатачивание абразивных зерен за счет скалывания их граней;

– периодическая смена активных абразивных зерен в процесс многократной экструзии рабочей среды;

– разные виды контактных взаимодействий на контурной и фактической площади контакта абразивного зерна и обрабатываемой поверхности;

– возможность менять условия контакта за счет применения последовательной обработки рабочими средами разных составов.

Рассмотренный метод применим для финишной обработки заготовок из порошкового молибдена.

Библиографический список

1. Zaman H.A., Sharif S., Dong-Won Kim, Idris M.H., Suhaimi M.A., Tumurkhuyag Z. Machinability of Cobalt-based and Cobalt Chromium Molybdenum Alloys – A Review // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. P. 563–570. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.150

2. KishawyH.A., Hosseini A. Machining Difficult-to-Cut

Materials // Materials Forming, Machining and Tribology. 2018. P. 97–137. [Электронный ресурс]. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-95966-5_4 https://doi.org/10.1007/978-3-319-95966-5_4(12.01.2019).
3. Ulutan D., Ozel T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2011. Vol. 51.Issue 3. P. 250–280. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.11.003
4. Mouralova K., Benes L., Prokes T., Zahradnicek R., Bednar J., Otoupalik J., et al. Micro-milling machinability of pure molybdenum // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 102. P. 4153–4165. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03524-5
5. Sortino M., Totis G., Prosperi F. Dry turning of sintered molybdenum // Journal of Materials Processing Technology.2013. Vol. 213. Issue 7. P. 1179–1190. http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.01.017
6. Промптов А.И. Особенности процесса стружкообразования при резании молибденового сплава // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 2. С. 32–36.
7. Левко В.А., Симакова А.Е., Савин Д.И. Повышение эффективности обработки абразивным потоком за счет управления факторами жизненного цикла рабочей среды // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18. № 4. С. 932–938.
8. Mohammadian N., Turenne S., Brailovski V. Surface finish control of additively manufactured Inconel 625 components using combined chemical-abrasive flow polishing // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 252. P. 728–738. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.10.020
9. Patent no. 3521412, U.S., ISC B24B 1/00, 19/00. Method of honing by extruding / McCarty R.W. Filed 12.04.1968; published 21.07.1970.
10. Gorana V.K., Jain V.K., Lal G.K. Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2004. Vol. 44. Issue 2–3. P. 201–211. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.10.004
11. Gorana V.K., Jain V.K., Lal G.K. Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining // Wear. 2006. Vol. 260.Issue 1–2. P.128–139. http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.12.038
12. Petare A.C., Jain N.K. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 97. Issue 1. P. 741–782.https://doi.org/10.1007/s00170-018-1928-7
13. Kumar S.S., Hiremath S.S. A Review on Abrasive Flow Machining (AFM) // Procedia Technology. 2016. Vol. 25. P. 1297–1304. http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.224
14. Wei Haibo, Peng Can, Gao Hang, Xuanping, Xuyue Wang. On establishment and validation of a new predictive model for material removal in abrasiveflow machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2019. Vol. 138. P. 66–79. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.12.003
15. ZhangKe Hua, DingJin Fu, XuYong Chao.Research on Process Parameters Influencing on Cutting Force in Abrasive Flow Machining (AFM) // Advanced Materials Research, 2013. Vol. 797. P. 390–395. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.797.390
16. Носенко В.А., Авилов А.В., Ладыгина О.М., Кузнецов С.П. Поверхность корунда после взаимодействия с молибденом в условиях микроцарапания на скорости 60 м/с // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 10. С. 39–44
17. Левко В.А. Контактные процессы при абразивно-экструзионной обработке // Металлообработка. 2008. № 3. С. 19–23.
18. Uhlmann E., Schmiedel C., Wendler J. CFD Simulation of the Abrasive Flow Machining Process // Procedia CIRP. 2015. Vol. 31. P. 209–214. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.091
19. Wang Tingting, Chen De, Zhang Weihua, An Luling. Study on key parameters of a new abrasive flow machining (AFM) process for surface finishing // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 101. Issue 2. P. 39–54. https://doi.org/10.1007/s00170-018-2914-9
20. Zhu Li Feng, Wang Kai, Wu Huan, Xiu Dong, Sun Li Zhong. Research on the Methods for Common-Rail Pipe Holes Abrasive Flow Machining // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 721. P. 122–126. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.721.122
21. Wu Ming Yu, Gao Hang. The Research of Extruded Pressure Auto-Adjustment Method in Abrasive Flow Polishing // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1027. P. 203–207. https://doi.org/10.4028/www. scientific.net/AMR.1027.203
22. Dash R., Maity K. Simulation of abrasive flow machining process for 2D and 3D mixture models // Frontiers of Mechanical Engineering. 2015. Vol. 10. P. 424–432. https://doi.org/10.1007/s11465-015-0366-6
23. Xiu Tian-Xun, Wang Wei, Liu Kun, Wang Zhi-Yong, Wei Dao-Zhu. Characteristics of force chains in frictional interface during abrasive flow machining based on discrete element method // Advances in Manufacturing. 2018. Vol. 6. P. 355–375. https://doi.org/10.1007/s40436-018-0236-7
24. Левко В.А., Лубнин М.А., Снетков П.А., Пшенко Е.Б., Турилов Д.М. Исследование влияния формы обрабатываемого канала на течение рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. 2009. № 4. С. 138–145.
25. Левко В.А. Модель течения рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке тонких осесимметричных каналов большой длины // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2008. № 2. С. 85–94.
26. Левко В.А. Особенности реологии при абразивно-экструзионной обработке // Вестник Сибирского

государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева.2005. № 7. С. 96–100.
27. Bremerstein T., Potthoff A., Michaelis A., Schmiedel C., Uhlmann E., Blug B., et al. Wear of abrasive media and its effect on abrasive flow machining results //Wear. 2015. Vol. 342–343. P. 44–51. https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.08.013

References

1. Zaman HA, Sharif S, Dong-Won Kim, Idris MH, Suhaimi MA, Tumurkhuyag Z. Machinability of Cobalt-based and Cobalt Chromium Molybdenum Alloys – A Review. Procedia Manufacturing. 2017;11:563–570. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.150
2. Kishawy HA, Hosseini A. Machining Difficult-to-Cut Materials. Materials Forming, Machining and Tribology. 2018:97–137. Available from: https://link. springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-95966-5_4 https://doi.org/10.1007/978-3-319-95966-5_4 [Accessed 12th January 2019].
3. Ulutan D, Ozel T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2011;51(3):250–280. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.11.003
4. Mouralova K, Benes L, Prokes T, Zahradnicek R, Bednar J, Otoupalik J, et al. Micro-milling machinability of pure molybdenum. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019;102:4153–4165. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03524-5
5. Sortino M, Totis G, Prosperi F. Dry turning of sintered molybdenum. Journal of Materials Processing Technology. 2013;213(7):1179–1190. http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.01.017
6. Promptov AI. Features of chip formation under molybdenum alloy cutting. *Vestnik Ir-kutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2012;2:32–36. (In Russ.)
7. Levko VA, Simakova AE, Savin DI. The efficiency improving of abrasive flow machining on managing of the life cycle factors of media. *Sibirskij zhurnal nauki I tehnologij* = Siberian Journal of Science and Technology. 2017;18(4):932–938. (In Russ.)
8. Mohammadian N, Turenne S, Brailovski V. Surface finish control of additively manufactured Inconel 625 components using combined chemical-abrasive flow polishing. Journal of Materials Processing Technology. 2018;252:728–738. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.10.020
9. McCarty RW. *Method of honing by extruding.* Patent U.S., no. 3521412; 1970.
10. Gorana VK, Jain VK, Lal GK. Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2004;44(2–3):201–211. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.10.004
11.Gorana VK, Jain VK, Lal GK. Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining. Wear. 2006;260(1–2):128–139. http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.12.038
12. Petare AC, Jain NK. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;97(1):741–782. https://doi.org/10.1007/s00170-018-1928-7
13. Kumar SS, Hiremath SS. A Review on Abrasive Flow Machining (AFM). Procedia Technology. 2016;25:1297–1304. http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.224
14. Wei Haibo, Peng Can, Gao Hang, Xuanping, Xuyue Wang. On establishment and validation of a new predictive model for material removal in abrasive flow machining. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2019;138:66–79. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.12.003
15. Zhang Ke Hua, Ding Jin Fu, Xu Yong Chao. Research on Process Parameters Influencing on Cutting Force in Abrasive Flow Machining (AFM). Advanced Materials Research, 2013;797:390–395. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.797.390
16. Nosenko VA, Avilov AV, Ladygina OM, Kuznetsov SP. Corund surface after interaction with molybden in conditions of microscarring on speed 60 m/s. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* = Modern high technologies. 2017;10:39–44. (In Russ.)
17. Levko VA. Contact processes under abrasive flow machining processes. *Metalloobrabotka* = Metalworking. 2008;3:19–23. (In Russ.)
18. Uhlmann E, Schmiedel C, Wendler J. CFD Simulation of the Abrasive Flow Machining Process. Procedia CIRP. 2015;31:209–214. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.091
19. Wang Tingting, Chen De, Zhang Weihua, An Luling. Study on key parameters of a new abrasive flow machining (AFM) process for surface finishing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019;101(2):39–54. https://doi.org/10.1007/s00170-018-2914-9
20. Zhu Li Feng, Wang Kai, Wu Huan, Xiu Dong, Sun Li Zhong. Research on the Methods for Common-Rail Pipe Holes Abrasive Flow Machining. Applied Mechanics and Materials. 2014;721:122–126. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.721.122
21. Wu Ming Yu, Gao Hang. The Research of Extruded Pressure Auto-Adjustment Method in Abrasive Flow Polishing. Advanced Materials Research. 2014;1027:203–207. https://doi.org/10.4028/www. scientific.net/AMR.1027.203
22. Dash R, Maity K. Simulation of abrasive flow machining process for 2D and 3D mixture models. Frontiers of Mechanical Engineering. 2015;10:424–432. https://doi.org/10.1007/s11465-015-0366-6
23. Xiu Tian-Xun, Wang Wei, Liu Kun, Wang Zhi-Yong, Wei Dao-Zhu. Characteristics of force chains in friction-

al interface during abrasive flow machining based on discrete element method. Advances in Manufacturing. 2018;6:355–375. https://doi.org/10.1007/s40436-018-0236-7
24. Levko VA, Lubnin MA, Snetkov PA, Pshenko EV, Turilov DM. Research on the influence of the canal finishing shape on the flow in media for abrasive flow machining processes. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* = Vestnik of SibGAU. 2009;4:138–145. (In Russ.)
25. Levko VA. A model of working medium flow during abrasive-extrusion processing of thin axisymmetric channels of long length. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* = I. Yakovlev Chuvash State Pedagogical University Bulletin. Series: Mechanics of the Ultimate State. 2008;2:85–94. (In Russ.)
26. Levko VA. Rheology features under abrasive-extrusion processing. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* = Vestnik of SibGAU. 2005;7:96–100. (In Russ.)
27. Bremerstein T, Potthoff A, Michaelis A, Schmiedel C, Uhlmann E, Blug B, et al. Wear of abrasive media and its effect on abrasive flow machining results. Wear. 2015;342–343:44–51. https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.08.013

Критерии авторства

Левко В.А., Савин Д.И., Литовка О.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Levko V.A., Savin D.I., Litovka O.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Левко Валерий Анатольевич,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры технологии машиностроения,
Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева,
660037, г. Красноярск, пр. газеты Красноярский рабочий, 31, Россия;
✉ e-mail: levko@sibsau.ru

Савин Дмитрий Игоревич,
аспирант,
Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева,
660037, г. Красноярск, пр. газеты Красноярский рабочий, 31, Россия;
e-mail: 3608318@mail.ru

Литовка Ольга Владимировна
аспирант,
Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева,
660037, г. Красноярск, пр. газеты Красноярский рабочий, 31, Россия;
e-mail: litovka.9518@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valery A. Levko,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology,
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk 660037, Russia
✉ e-mail: levko@sibsau.ru

Dmitry I. Savin,
Postgraduate Student,
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk 660037, Russia
e-mail: 3608318@mail.ru

Olga V. Litovka,
Postgraduate Student,
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk 660037, Russia
e-mail: litovka.9518@gmail.com

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.512
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-52-63

Повышение твердости поверхностного слоя малоуглеродистой стали за счет плазменной обработки модифицирующей обмазки

© Нгуен Ван Чьеу
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – провести исследования по оценке возможности повышения твердости поверхностного слоя стали марки Ст3 при плазменном нагреве нанесенной поверхностной обмазки, содержащей порошковый сплав ПР-Н80Х13С2Р**.** Методы исследования заключались в измерении макротвердости на стационарном приборе HBRV-187,5. Измерение микротвердости на приборе DuraScan G5 проводилось с системой автоматического считывания отпечатков. Теоретические методы заключались в анализе химического состава обмазок, в результате которого они были разделены на 2 группы: для печной химико-термической обработки и плазменного поверхностного оплавления. Расчетные методы включали статистическую обработку результатов экспериментов и построения зависимостей. Глубина модифицирующего слоя (в зависимости от способа обработки) при химико-термической обработке – 1 мм, плазменном оплавлении – 2 мм. Результаты измерения макротвердости поверхности показали, что полученное покрытие из смеси ПР-Н80Х13С2Р+Cr_2O_3+NH_4Cl обладает более равномерным распределением высокой твердости поверхности (31–64 HRC (метод Роквелла – метод неразрушающей проверки твердости материалов)); при использовании в качестве покрытия только сплава ПР-Н80Х13С2Р твердость поверхности изменяется в большом диапазоне (15–60 HRC). Исследования микротвердости поперечного сечения поверхностного слоя показали, что диффузионная область из смеси порошка ПР-Н80Х13С2Р+Cr_2O_3+NH_4Cl обладает равномерной твердостью (450–490 HV); при нанесении сплава ПР-Н80Х13С2Р – твердость увеличивается в глубине оплавленной области (от 300 до 600 HV) и резко снижается в зоне термического влияния (210–170 HV). Использование порошкового сплава ПР-Н80Х13С2Р как основного компонента в составе обмазки, нанесенной на поверхности Ст3 при плазменной обработке, приводит к образованию модифицированного поверхностного слоя с высокой твердостью.

***Ключевые слова*:** хромоникелирование, химико-термическая обработка, плазменный нагрев, паста, макротвердость, микротвердость

Информация о статье: Дата поступления 18 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 24 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Нгуен Ван Чьеу. Повышение твердости поверхностного слоя малоуглеродистой стали за счет плазменной обработки модифицирующей обмазки. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 1. С. 52–63. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-52-63

Improving low-carbon steel surface layer hardness through modifying coating plasma treatment

Nguyen Van Trieu
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to conduct research to assess the possibility of increasing the St 3 steel surface layer hardness under plasma heating of surface coating containing PR-N80H13S2R powder alloy. Research methods involve measuring macrohardness using a stationary device HBRV-187,5. Microhardness is measured using the DuraScan G5 device with an automatic fingerprint reading system. The theoretical methods include the analysis of chemical composition of coatings. As a result coatings are divided into 2 groups: for furnace chemical-heat treatment and plasma surface reflow. Calculation methods include statistical processing of experiment results and building dependencies. The depth of the modifying layer (depending on the processing method) is 1 mm under chemical and thermal treatment, and 2 mm under plasma reflow. Measurement results of surface macrohardness have shown that the resulting coating from PR-N80H13S2R+Cr_2O_3+NH_4Cl mixture features a more uniform distribution of high surface hardness (31–64 HRC according to the Rockwell method of non-destructive testing of material hardness), if the coating consists from PR-N80H13S2R alloy only the surface hardness varies in a larger range (15–60 HRC). The studies of the surface layer cross-section microhardness have shown that the diffusion region made of PR-N80H13S2R+Cr_2O_3+NH_4Cl powder mix-

ture features a uniform hardness (450–490 HV). Coating of the PR-N80H13S2R alloy increases hardness in the depth of the melted area (from 300 to 600 HV) and decreases it sharply in the zone of thermal influence (210–170 HV). The use of the powder alloy PR-N80H13S2R as the main component of coating applied to the steel 3 surface under plasma treatment results in the formation of a modified surface layer of high hardness.

***Keywords**:* chrome nickel plating, chemical-thermal treatment, plasma heating, paste, macrohardness, microhardness

Information about the article: Received November 18, 2019; accepted for publication December 24, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Nguyen Van Trieu. Improving low-carbon steel surface layer hardness through modifying coating plasma treatment. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):52–63. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-52-63

1. ВВЕДЕНИЕ

Повышение твердости малоуглеродистых сталей изготавливающихся деталей машин является актуальной задачей, т.к. позволяет решить два важных вопроса: снизить стоимость изготовления и увеличить износостойкость. Для этих целей применяют различные технологические процессы, которые связаны либо с термомеханическим воздействием на поверхностный слой металла, либо с модификацией поверхностного слоя за счет введения дополнительных элементов. В машиностроении важна проблема повышения физико-механических и эксплуатационных свойств в поверхностных слоях таких деталей, как калибры, инструмент, сверла, цилиндры двигателей внутреннего сгорания и т.д. В настоящее время указанные задачи во многих случаях решаются путем нанесения упрочняющих покрытий. Для проведения модифицирующей обработки с целью повышения твердости в виде нанесения покрытий, паст, обмазок сегодня могут использовать порошковые сплавы, которые обеспечивают высокую коррозионную стойкость, твердость, износостойкость [1–4]. Порошковые сплавы на основе никеля применяют для повышения коррозионной стойкости углеродистых и низколегированных сталей [5, 6].

В работах [7, 8] показана возможность получения защитного покрытия при диффузионном хромоникелировании с помощью химико-термической обработки (ХТО) для порошкового материала на основе железа. В работах [9–11] показано, что получение покрытия при оплавлении порошковых сплавов системы Ni-Cr-B-Si возможно при применении высококонцентрированных источников, таких, как токи высокой частоты (ТВЧ), плазменное напыление [3], лазерный луч [12], плазменная обработка [1, 13, 14]. Плазменная обработка металлов происходит благодаря обеспечению высокой плотности мощности энергии, быстрому теплоотводу, короткой длительности нагрева, простым устройствам. Использование плазменной дуги может привести к формированию качественного покрытия [15, 16]. В работах [17, 18] рассмотрены результаты хромирования и цементации поверхностного слоя металла, отмечается высокая твердость поверхностного слоя, а также возможность получения высокой твердости диффузионного хромированного покрытия при нанесении смеси хромирующего состава в виде паст, под нагревом плазменной дуги [17]. Получаемые твердые покрытия обладают высоким коррозионным сопротивлением в атмосфере, растворах нескольких кислот, многих солей [2, 9–11, 19], но хромированные покрытия отличаются большой пористостью, склонны к растрескиванию. Поэтому при использовании хрома в составе защитного покрытия приветствуется его сочетание с другими металлами, например, с никелем [9, 10]. При применении сплава никеля присутствие хрома увеличивает твердость покрытия за счет образования твердых карбидов с улучшенной стойкостью к окислению и коррозии при повышенных температурах [20–23].

2. ЦЕЛЬ ДАННОЙ РАБОТЫ

Целью исследования явилась оценка возможности повышения твердости по-

верхностного слоя образца стали марки Ст3 при использовании порошка ПР-Н80Х13С2Р в процессе обработки с помощью плазменной дуги (ПР – порошок); в статье приводятся результаты исследований распределения макротвердости и микротвердости поперечного сечения хромированного слоя металла.

3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы после плазменной обработки разрезали на автоматическом отрезном станке Полилаб Р100А, а затем использовали пресс Полилаб С50А. Для полировки поверхности микрошлифов задействовали шлифовально-полировальный станок Полилаб П12М. Перед изучением микроструктуры образцы травили в 5% азотной кислоте. Микроструктура наблюдалась с помощью оптического микроскопа МЕТ-2. Макротвердость измеряли на приборе HBRV-187,5, а микротвердость – твердомерами серии DuraScan G5. Для подготовки пасты использованы порошки: сплав ПР-Н80Х13С2Р, оксид алюминия Al_2O_3 (ГОСТ 8136-85[1]), оксид хрома (Cr_2O_3, ГОСТ 2912-79[2]), хлорид аммония (NH_4Cl, ГОСТ 2210-73[3], ГОСТ 3773-72[4]).

Для нанесения покрытия и проведения обработки была выбрана Ст3. Химический состав сплава ПР-Н80Х13С2Р приведен в табл. 1.

Подготовка пасты: порошок с мелкозернистой формой смешивали вместе, образуя ровную смесь. Пасты были изготовлены при перемешивании смеси порошков в силикатном клее с объемным отношением 1:1. Полученную пасту наносили на поверхность стали с толщиной около 1 мм.

Сушка покрытых пастой образцов проводилась в сушильном шкафу СШ-80-1 СПУ при температуре 50°С в течение 1 ч.

Нагрев образцов под плазменной дугой: плазменный нагрев выполнялся на установке, которая включает источник питания Kempi PSS5000, встроенный осциллятор для поджига дуги, пульт дистанционного управления, цифровой анализатор (для снятия значений силы тока и напряжения), систему охлаждения, баллонную установку с плазмообразующими газами (аргоном, углекислым газом), плазмотрон и штатив. Штатив оснащен зажимными устройствами, которые позволяют закреплять плазмотрон и менять высоту дугового промежутка. Также установка состоит из механизма перемещения с линейной скоростью от 2 до 15 мм/с.

Таблица 1

Химический состав сплава ПР-Н80Х13С2Р

Table 1

Chemical composition of PR-N80H13S2R alloy

Наименование элементов	C	Si	Cr	B	Ni	Fe	HRC*
Содержание, % масс.	0,2–0,4	2,0–2,8	12–14	1,2–1,8	остаток	≤ 3	25–35

*HRC – «Метод Роквелла» – метод неразрушающей проверки твердости материалов.

[1]ГОСТ 8136-85. Оксид алюминия активный. Технические условия. Введ. постановлением № 2422 от 29.07.85, изм. 01.07.1986. М.: Изд-во стандартов, 2004.
[2]ГОСТ 2912-79. Хрома окись техническая. Технические условия. Введ. постановлением № 291 от 29.01.79. М.: Изд-во стандартов, 1989.
[3]ГОСТ 2210-73. Аммоний хлористый технический. Технические условия. Введ. постановлением № 2966 от 23.08.84. М.: Изд-во стандартов, 1989.
[4]ГОСТ 3773-72. Аммоний хлористый. Технические условия. Введ. постановлением № 861 от 27.04.72. М.: Стандартинформ, 2007.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

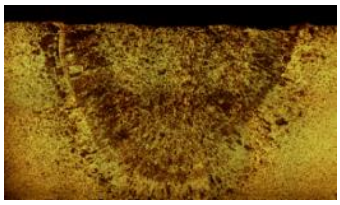
Все обработанные образцы были разделены на 2 группы: первая – только порошковая смесь ПР-Н80Х13С2Р (№ 1–3); вторая включает образцы, состоящие из ПР-Н80Х13С2Р, Cr_2O_3, Al_2O_3 и NH_4Cl (№ 4–9). При изучении микроструктуры установлено формирование покрытия на поверхности стали. Результаты исследования поверхностного слоя представлены в табл. 2.

Таблица 2

Образцы покрытия из состава порошка ПР-Н80Х13С2Р

Table 2

Samples of coatings composed of PR-N80H13S2R powder

№ образца	Состав пасты	Макроструктура	Глубина, мм	Примечание
1	ПР (тонкий слой пасты)		1,1	Наличие микротрещин
2	ПР (тонкий слой пасты)		0,7	–
3	ПР (толстый слой пасты)		0,3	Неровная поверхность
4	ПР: 49% Al_2O_3: 50% NH_4Cl: 1%		3	Неровная поверхность
5	ПР: 50% Al_2O_3: 45% NH_4Cl: 5%		2	Пузыри внутри диффузионной зоны
6	ПР: 50% Al_2O_3: 40% NH_4Cl: 10%		2	Пузыри внутри диффузионной зоны
7	ПР: 89% Cr_2O_3: 10% NH_4Cl: 1%		2	Равномерное покрытие Пузыри в крае насыщенной зоны
8	ПР: 89% Cr_2O_3: 10%		0,6	–
9	ПР: 95% NH_4Cl: 5%		2	Пузыри внутри диффузионной зоны

Покрытия из состава порошка ПР-Н80Х13С2Р образованы в результате поверхностного оплавления порошка и металла. Обработанный образец 1 получен после быстрого, а остальные – после медленного охлаждения. Все образцы были покрыты пастой толщиной не больше 1 мм.

Из табл. 2 видно, что в процессе плазменного нагрева образуется большая сварочная ванна. Поверхностный слой металла после охлаждения неравномерен по глубине. При оплавлении тонкого слоя пасты поверхностный слой более равномерен, с максимальной глубиной около 1 мм, а при оплавлении толстого – 0,3 мм. На поверхности образца № 3 покрытие только оплавлялось, а не насыщалась. В то же время видна большая зона термического влияния. При быстром охлаждении образца № 1 возникает трещина из-за усадки. Поверхности обработанных образцов с тонким слоем обмазки более ровные, чем с толстым (т.к. встречаются нерасплавленные частицы). Такая неровность расплавления объясняется ограничением теплопередачи во внутренних подслоях при увеличении толщины обмазки в режиме нагрева плазмой. Вследствие этого значения макротвердости на поверхности тонкого покрытия находятся в диапазоне 9–14 HRC, толстого покрытия – 30–60 HRC. Зная, что сплавы феррохром, силикохром, нихром могут быть поставщиками хрома [9–11], можно внести дополнительные изменения в сплав ПР-Н80Х13С2Р при хромировании. В составах образцов под № 4–6 использовали оксид алюминия (Al_2O_3) как балластную добавку, хлорид аммония (NH_4Cl) как активатор процессов восстановления и насыщения. В составе образцов под № 7, 8 вводили оксид хрома Cr_2O_3 в роли поставщика хрома. Известно, что состав порошка ПР-Н80Х13С2Р (как поставщика хрома) можно дополнительно увеличить содержанием данного элемента за счет реакции его восстановления из Cr_2O_3 благодаря наличию восстановительного элемента – кремния (Si). Присутствие бора в сплаве будет активировать диффузию никеля в поверхностный слой стали.

Все покрытия из второй группы, содержащие хлорид аммония в составах, образуют поверхностные слои с глубиной 2–3 мм (темные зоны) и большую зону термического влияния. Это показывает, что присутствие хлорида аммония сильно влияет на процесс образования диффузионных зон легированного и термического влияния. Полученные слои обладают высокой твердостью и имеют некоторые недостатки: неровную поверхность, возникновение пор и трещин. Исследование микроструктуры покрытия образцов показало изменения фазового состава феррита и ледебурита, а изменений в легированной зоне не наблюдается (рис. 1). Структура мартенсита формируется, когда в составе покрытия есть NH_4Cl (образцы 7, 9), а отсутствие хлорида аммония приводит к образованию цементированного слоя (образец 8).

Очевидно, что присутствие хлорида аммония в составах пасты приводит к образованию объема пор (к увеличению их размеров) оплавленного поверхностного слоя (образец 9). Более качественными (без пор и трещин) являются покрытия из составов 2, 7. Это может объясняться тем, что в процессе ХТО происходят взаимодействие между компонентами покрытия,

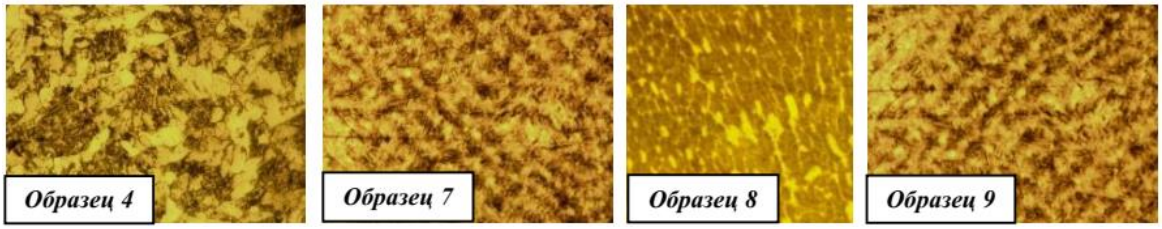


Рис. 1. Микроструктура образованных зон после плазменной обработки
Fig. 1. Microstructure of zones formed after plasma treatment

диффузионные реакции с образованием газов в процессе легирования стали, т.к. хлорид аммония играет роль активатора химических процессов:

$$NH_4Cl \rightarrow NH_3 + HCl;$$

$$NH_3 \rightarrow N + 3/2H_2;$$

$$Cr + 2HCl \leftrightarrows CrCl_2 + H_2.$$

Исследование микроструктуры поперечного сечения образца 2 показало, что по глубине от поверхности можно выделить три области: область оплавленного материала (зоны A, B, C), теплового воздействия (зона D), основной стали (зона E) (рис. 2). По ширине покрытия двух областей: 1-я как основная, с максимальной глубиной 0,7 мм; 2-я как крайняя, с глубиной около 0,2 мм. Область 2 отличается тем, что на микроструктуре видны различные зоны. Макротвердости поверхности измерили на приборе HBRV-187,5 с расстоянием точек друг от друга 1–3 мм. Макротвердость поверхности покрытия – в диапазоне 15–44 HRC, а среднее значение непокрытой зоны составляет около 8 HRC (рис. 3). Скачок макротвердости точки 2 и 10 может быть связан с неоднородной диффузией, вследствие этого образованы различные структурные фазы, в точках 2, 10 есть более жесткие их аналоги.

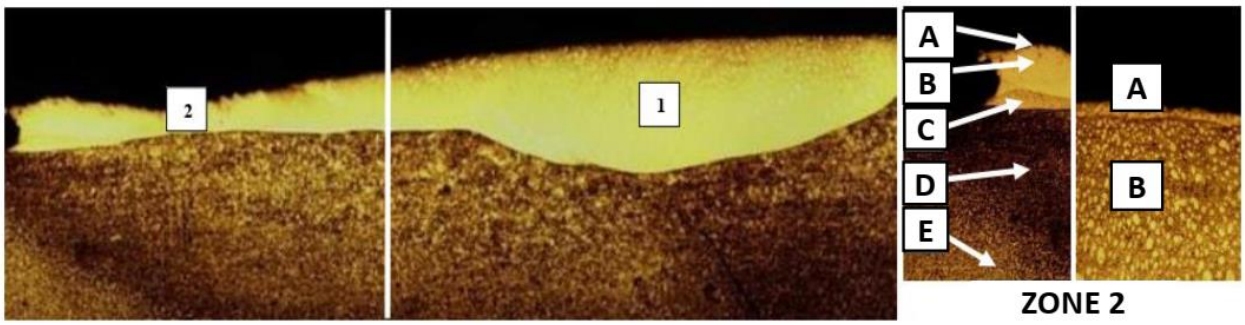


Рис. 2. Образованные зоны образца 7 после обработки плазмой
Fig. 2. Formed zones of sample 7 after plasma treatment

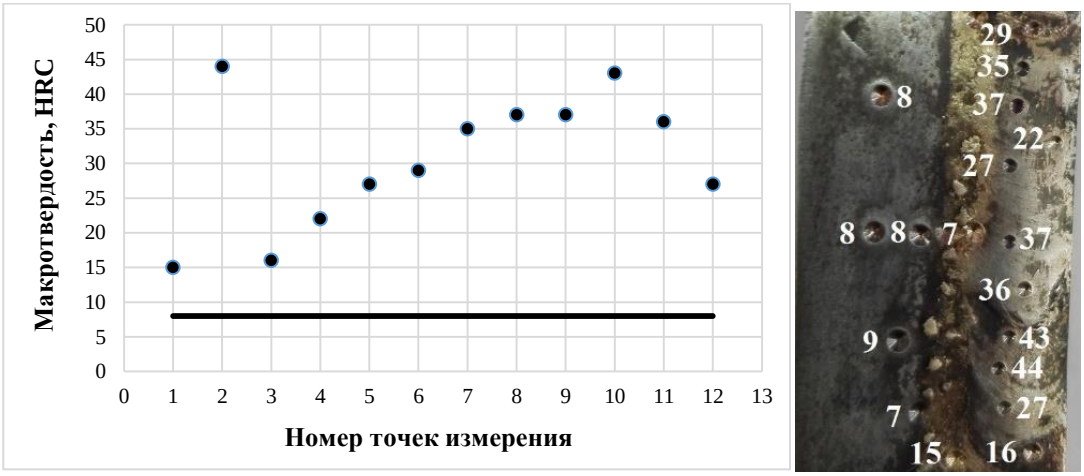
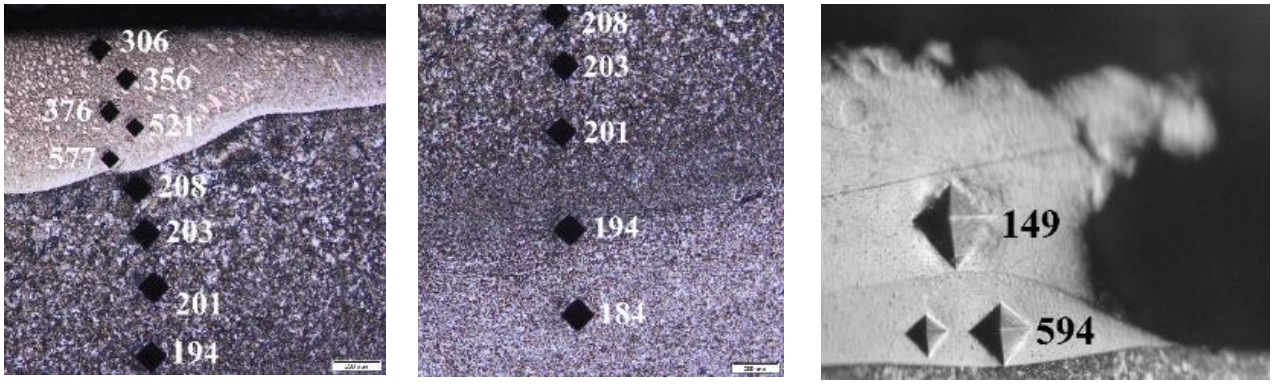


Рис. 3. Изменение макротвердости поверхности обработанного образца 2
——— – среднее значение макротвердости непокрытой зоны поверхности стали 3
Fig. 3. Macrohardness variation on the surface of the treated sample 2
——— – average value of steel 3 bare surface macrohardness

Измерение микротвердости показало, что значение данного показателя увеличивается по глубине от поверхности вовнутрь зоны оплавления сплава. В переходной зоне на глубине 600 мкм микротвердость снижается и имеет значение твердости основного металла (см. рис. 4, 5). Очевидно, что в оплавленной зоне произошло легирование хромом, а в зоне термического влияния – структурные изменения без диффузии элементов металлов в глубокие слои стали, оплавленный слой сплава поглощает энергию и мешает теплопередаче в глубине. Результаты измерения микротвердости показали, что ширина зоны термического влияния небольшая. В крайних областях пятна нагрева видны два подслоя в виде пятен. Микротвердость под нагрузкой 0,5 кг верхнего подслоя составляет 149 HV, а нижнего – 594 HV.

Образец 7 имеет самую высокую твердость на поверхности. Зоны покрытия можно разделить на две: одну – с глубиной около 2 мм (зона 1), другую – около 10 мкм (зона 2) (рис. 6).



a *b* *c*

Рис. 4. Точки измерения микротвердости образца 2: a – область оплавленного материала и зона теплового воздействия, нагрузка – 2 кг; b – зона теплового воздействия и зона основной стали, нагрузка – 2 кг; c – подслои крайней зоны покрытия, нагрузка – 0,5 кг
Fig. 4. Microhardness measuring points of the sample 2: a – area of melted material and heat affected zone, load – 2 kg; b – heat affected zone and area of the main steel, load – 2 kg; c – sublayers of the extreme coverage area, load – 0.5 kg

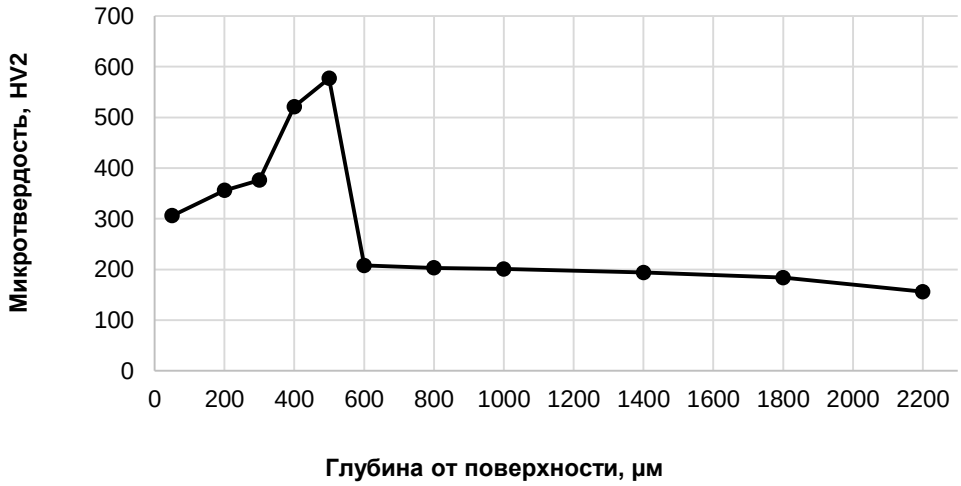


Рис. 5. Распределение микротвердости по глубине образца при дистанции от поверхности
Fig. 5. Microhardness distribution over the sample depth at the distance from the surface



Рис. 6. Зоны покрытия образца 7
Fig. 6. Coating areas of sample 7

Хотя глубины двух зон значительно разнятся, твердость поверхности их не особенно отличается. Макротвердости поверхности измерили на приборе HBRV-187,5 с расстоянием точек друг от друга 1–3 мм. Среднее значение макротвердости зоны 2 составляет 36 HRC, а твердость зоны 1 находится в диапазоне 31–64 HRC с расстоянием измеренных точек друг от друга по длине образца около 5 мм, по ширине 2–3 мм (по маркерам) (см. рис. 7). Повышенная твердость зоны 2 имеется благодаря образованию тонкого, легированного хромом, слоя.

Приведенные результаты на рис. 8, 9 показывают, что твердость по глубине легированного слоя равномерна и составляет 445–490 HV. В переходной зоне твердость снижается в среднем на 100 HV, в диапазоне 340–400 HV. В зонах основного металла стали твердость состоит 260–270 HV.

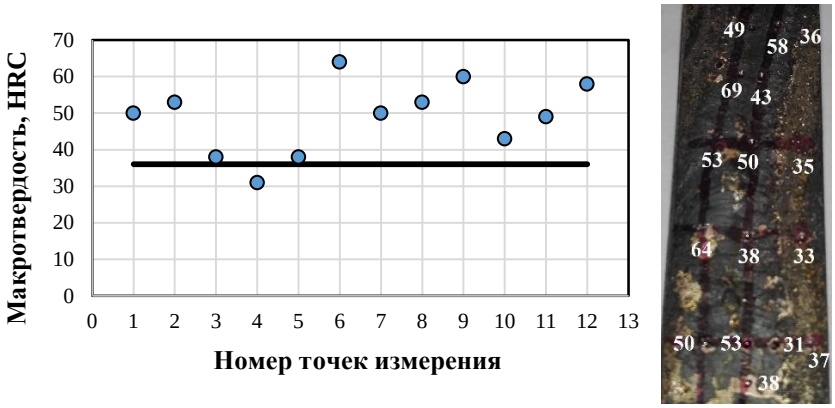
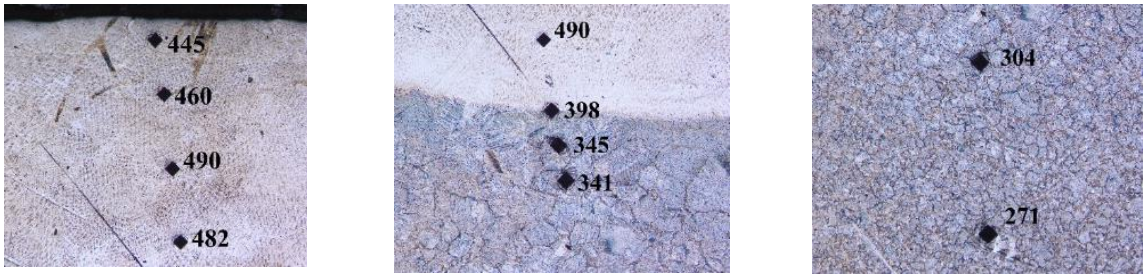


Рис. 7. Изменение макротвердости поверхности обработанного образца 7
——— – среднее значение макротвердости зоны 2 поверхности стали 3
Fig. 7. Macrohardness variation on the surface of the treated sample 7
——— – average value of macrohardness of zone 2 of steel 3 surface



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

Рис. 8. Точки измерения микротвердости образца 7 при нагрузке 2 кг: a – область диффузионной зоны; b – область диффузионной и переходной зон; c – переходная зона и зона основной стали
Fig. 8. Microhardness measuring points of sample 7 under the load of 2 kg: a – diffusion zone area; b – area of diffusion and transition zones; c – transition zone and zone of main steel

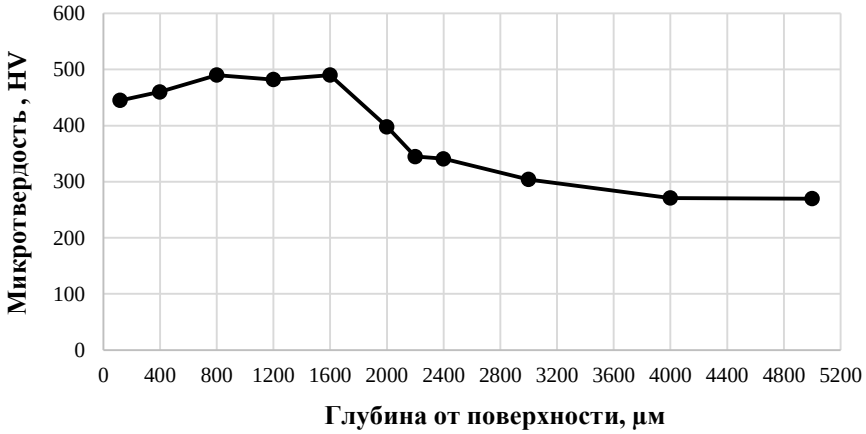


Рис. 9. Изменение микротвердости по глубине образца при дистанции от поверхности
Fig. 9. Depth variation of microhardness at the distance from the sample surface

Наблюдаемые при микроскопическом исследовании карбиды и высокие значения твердости доказали, что условия термической обработки значительно влияют на глубину и механические свойства. По сравнению с покрытием № 2, это может объяснить глубокую диффузию в основную сталь легирующих элементов, таких как никель, хром и кремний.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Использование порошкового сплава ПР-Н80Х13С2Р как основного компонента обмазки, нанесенной на поверхности Ст3 при плазменной обработке, приводит к образованию поверхностного модифицированного слоя с толщиной около 1–3 мм. Присутствие в составе покрытия NH_4Cl приводит к образованию пор внутри слоя диффузии, а толстые слои пасты на поверхности металла не позволяют формировать качественные покрытия на поверхности стали.

2. Изучение твердости двух типов обмазок показало, что комплексные смеси ПР-Н80Х13С2Р+Cr_2O_3+NH_4Cl обладают более равномерной высокой твердостью на поверхности покрытия после плазменного оплавления (31–64 HRC), а смесь только чистого ПР-Н80Х13С2Р дает значение твердости на поверхности в широком диапазоне (15–60 HRC).

3. Распределение микротвердости по глубине легированного слоя из комплексной смеси ПР-Н80Х13С2Р+Cr_2O_3+NH_4Cl обладает равномерной твердостью (450–490 HV), а из смеси только ПР-Н80Х13С2Р твердость увеличивается в глубину оплавленного области (от 300 до 600 HV), сильно снижается в зоне термического влияния (210–170 HV).

4. Практически доказана возможность образования ровного покрытия (оплавленного с высокой твердостью) из тонкого слоя нанесенной пасты, состоящей только из сплава ПР-Н80Х13С2Р. Осуществлена практическая реализация получения равномерного толстого поверхностного покрытия с высокой твердостью из тонкого слоя нанесенной пасты, содержащей сплав ПР-Н80Х13С2Р, оксид хрома, хлорида аммония. Дальнейшие исследования с данными компонентами позволят улучшить качество покрытия, а также изучить фазово-химический состав получаемого покрытия.

Библиографический список

1. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. 180 с.

2. Чудина О.В. Комбинированные методы поверхностного упрочнения сталей с применением лазерного нагрева. Теория и технология. М.: МАДИ (ГТУ),

2003. 248 с.
3. Liang-Yu Chen, Tian Xiang Xu, Sheng Lu, Ze-Xin Wang, Shujin Chen, Lai-Chang Zhang. Improved hardness and wear resistance of plasma sprayed nanostructured NiCrBSi coating via short-time heat treatment // Surface and Coatings Technology. 2018. Vol. 350. P. 436–444. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat. 2018.07.037
4. Liang-Yu Chen, Haiyang Wang, Cuihua Zhao, Sheng Lu, Ze-Xin Wang, Jin Sha, et al. Automatic remelting and enhanced mechanical performance of a plasma sprayed NiCrBSi coating // Surface and Coatings Technology. 2019. Vol. 369. P. 31–43. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.052
5. Rachidi R., Kihel B.E., Delaunois F. Microstructure and mechanical characterization of NiCrBSi alloy and NiCrBSi-WC composite coatings produced by flame spraying // Materials Science and Engineering: B. 2019. Vol. 241. P. 13–21. https://doi.org/10.1016/ j.mseb.2019.02.002
6. Поут Д. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / пер. с англ. М.: Машиностроение, 1987. 424 с.
7. Попова Н.В. Диффузионное хромоникелирование порошковых материалов на основе железа с применением обмазок и нагрева токами высокой частоты (ТВЧ) // Новые задачи технических наук и пути их решения: сборник статей Междунар. науч.-практ. конф. (г. Пермь, 10 ноября 2016 г.). Уфа: Аэтерна, 2016. С. 146–147.
8. Попова Н.В., Салмин Р.А., Чекалдин А.Н. Структура и свойства хромоникелевого покрытия на железоуглеродистых порошковых материалах // Инновационные технологии в науке нового времени: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 1 февраля 2017 г.). Уфа: Аэтерна, 2017. Ч. 3. С. 89–91.
9. Попова Н.В. Основы управления рисками // Внедрение результатов инновационных разработок: проблемы и перспективы: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф.: в 4 ч. (г. Екатеринбург, 18 ноября 2016 г.). Уфа: Омега сайнс, 2016. Ч. 3. С. 142–143.
10. Sousa J.M.S., Ratusznei F., Pereira M., Castro R.M., Curi E.I.M. Abrasion resistance of Ni-Cr-B-Si coating deposited by laser cladding process // Tribology International. 2020. Vol. 143. P. 106002. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106002
11. Литвинов А.П. Использование высококонцентрированных источников нагрева для модифицирования наплавленных слоев // Вісник Приазовського державного технічного університету. 2009. Вип. 19. С. 156–160. http://eir.pstu.edu/handle/ 123456789/341
12. Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Kharanzhevskiy E.V. Improving the properties of a rapidly crystallized NiCrBSi laser clad coating by high-temperature processing // Journal of Crystal Growth. 2019. Vol. 525. P. 125200. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.125200
13. Ling Tang, Jia-jie Kang, Peng-fei He, Shu-yu Ding, Shu-ying Chen, Ming Liu, et al. Effects of spraying conditions on the microstructure and properties of NiCrBSi coatings prepared by internal rotating plasma spraying // Surface and Coatings Technology. 2019. Vol. 374. P. 625–633. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.06.056
14. Jiangwei Liu, Yan Wang, Hu Li, Costil S., Bolot R. Numerical and experimental analysis of thermal and mechanical behavior of NiCrBSi coatings during the plasma spray process // Journal of Materials Processing Technology. 2017. Vol. 249. P. 471–478. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.06.025
15. Гречнева М.В. Краткий анализ состояния технологий плазменного поверхностного упрочнения сталей и сплавов в РФ // International Conference on modern researches in science and technology: Conference Proceedings (Berlin, 31 January 2017). Berlin: Scientific public organization «Professional science», 2017. P. 14–34.
16. Balanovskii A.E., Grechneva M.V., Vu Van Huy, Zhuravlev D.A. New plasma carburizing method // Earth and Environmental Science: IOP Conference Series. 2017. Vol. 87. P. 092003. [Электронный ресурс]. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/87/9/092003/pdf (25.09.2019). https://doi.org/ 10.1088/1755-1315/87/9/092003
17. Balanovskii A.E., Vu V. Plasma surface carburizing with graphite paste // Letters on Materials. 2017. Vol. 7. Issue 2. P. 175–179. https://doi.org/10.22226/2410-3535-2017-2-175-179
18. Balanovskii A.E., Van Huy V. Estimation of Wear Resistance of Plasma-Carburized Steel Surface in Conditions of Abrasive Wear // Journal of Friction and Wear. 2018. Vol. 39. No. 4. P. 311–318. https://doi.org/10.3103/S1068366618040025
19. Chang Long Li, Han Xue Zhao, Masanobu Matsumura. Corrosion properties of materials coated with Cr2O3/NiCr and with Cr2O3+NiCr functionally gradient materials // Materials and Corrosion. 2000. Vol. 51. P. 502–510. https://doi.org/10.1002/1521-4176(200007)51:7<502::AID-MACO502>3.0.CO;2-3
20. Ahmadkhaniha D., Mahboubi F. Effects of plasma nitriding on properties of electroless Ni-B coating // Surface Engineering. 2012. Vol. 28. P. 195–198. https://doi.org/10.1179/1743294411Y.0000000058
21. Ghasemi A., Pouranvari M. Intermetallic phase formation during brazing of a nickel alloy using a Ni–Cr–Si–Fe–B quinary filler alloy // Science and Technology of Welding and Joining. 2018. Vol. 23. P. 342–351. https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1553280
22. Yong-xin Zhou, Jie Zhang, Zhi-guo Xing, Hai-dou Wang, Zhen-lin Lv. Microstructure and properties of NiCrBSi coating by plasma cladding on gray cast iron // Surface and Coatings Technology. 2019. Vol. 361. P. 270–279. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.12.055
23. Liang-Yu Chen, Haiyang Wang, Cuihua Zhao, Sheng Lu, Ze-Xin Wang, Jin Sha. Automatic remelting and enhanced mechanical performance of a plasma sprayed NiCrBSi coating // Surface and Coatings Technology. 2019. Vol. 369. P. 31–43. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.052

References

1. Balanovsky AE. *Plasma surface hardening of metals*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2006, 180 p. (In Russ.)
2. Chudina OV. *Combined methods of surface hardening of steels using laser heating. Theory and technology*. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University; 2003, 248 p. (In Russ.)
3. Liang-Yu Chen, Tian Xiang Xu, Sheng Lu, Ze-Xin Wang, Shujin Chen, Lai-Chang Zhang. Improved hardness and wear resistance of plasma sprayed nanostructured NiCrBSi coating via short-time heat treatment. Surface and Coatings Technology. 2018;350:436–444. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.07.037
4. Liang-Yu Chen, Haiyang Wang, Cuihua Zhao, Sheng Lu, Ze-Xin Wang, Jin Sha, et al. Automatic remelting and enhanced mechanical performance of a plasma sprayed NiCrBSi coating. Surface and Coatings Technology. 2019;369:31–43. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.052
5. Rachidi R, Kihel BE, Delaunois F. Microstructure and mechanical characterization of NiCrBSi alloy and NiCrBSi-WC composite coatings produced by flame spraying. Materials Science and Engineering: B. 2019;241:13–21 https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.02.002
6. Poate J.M. Surface Modification and Alloying by Laser, Ion and Electron Bmeams, 1987, 424 p. (Russ. ed.: *Modificirovanie i legirovanie poverhnosti lazernymi, ionnymi i elektronnymi puchkami.* Moscow, Mashinostroenie, 1987, 424 p.)
7. Popova NV. Diffusion chromonickeling of iron-based powder materials using coatings and heating with high-frequency currents (HFC). In: *Novye zadachi tekhnicheskih nauk i puti ih resheniya: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* = New challenges of engineering sciences and ways to solve them: Collected articles of the International scientific and practical conference. 10 November 2016, Perm': Ufa: Aeterna; 2016, p. 146–147. (In Russ.)
8. Popova NV, Salmin RA, Chekaldin AN. Chromium-nickel coating structure and properties on iron-carbon powder materials. In: *Innovacionnye tekhnologii v nauke novogo vremeni: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* = Innovative technologies in modern science: Collected articles of the International scientific and practical conference. 1 February 2017, Ufa. Ufa: Aeterna; 2017, part 3, p. 89–91. (In Russ.)
9. Popova NV. Fundamentals of risk management. *Vnedrenie rezul'tatov innovacionnyh razrabotok: problemy i perspektivy: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* = Implementation of innovative development results: Problems and Prospects: Collected articles of International scientific and practical conference. 18 November 2016, Ekaterinburg. Ufa: Omega science; 2016, part 3, p. 142–143. (In Russ.)
10. Sousa JMS, Ratusznei F, Pereira M, Castro RM, Curi EIM. Abrasion resistance of Ni-Cr-B-Si coating deposited by laser cladding process. Tribology International. 2020;143:106002. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106002
11. Litvinov AP. Use of highly concentrated heat sources for deposited layer modification. Вісник Приазовського державного технічного університету= Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences. 2009;19: 156–160. http://eir.pstu.edu/handle/123456789/341
12. Makarov AV, Soboleva NN, Malygina IYu, Kharanzhevskiy EV. Improving the properties of a rapidly crystallized NiCrBSi laser clad coating by high-temperature processing. Journal of Crystal Growth. 2019;525:125200.
https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.125200
13. Ling Tang, Jia-jie Kang, Peng-fei He, Shu-yu Ding, Shu-ying Chen, Ming Liu, et al. Effects of spraying conditions on the microstructure and properties of NiCrBSi coatings prepared by internal rotating plasma spraying. Surface and Coatings Technology. 2019;374:625–633. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.06.056
14. Jiangwei Liu, Yan Wang, Hu Li, Costil S, Bolot R. Numerical and experimental analysis of thermal and mechanical behavior of NiCrBSi coatings during the plasma spray process. Journal of Materials Processing Technology. 2017;249:471–478. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.06.025
15. Grechneva MV. Brief analysis of the state of plasma surface hardening technologies for steels and alloys in the Russian Federation. In: International Conference on modern researches in science and technology: Conference Proceedings. 31 January 2017, Berlin. Berlin: Scientific public organization “Professional science”; 2017, p. 14–34.
16. Balanovskii AE, Grechneva MV, Vu Van Huy, Zhuravlev DA. New plasma carburizing method. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series.* 2017;87:092003. Available from: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/87/9/092003/pdf [Accessed 25th September 2019]. https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/9/092003
17. Balanovskii AE, Vu V. Plasma surface carburizing with graphite paste. Letters on Materials. 2017;7(2):175–179. https://doi.org/10.22226/2410-3535-2017-2-175-179
18. Balanovskii AE, Van Huy V. Estimation of wear resistance of plasma-carburized steel surface in conditions of abrasive wear. Journal of Friction and Wear. 2018;39(4):311–318. https://doi.org/10.3103/S1068366618040025
19. Chang Long Li, Han Xue Zhao, Masanobu Matsumura. Corrosion properties of materials coated with Cr2O3/NiCr and with Cr2O3+NiCr functionally gradient materials. Materials and Corrosion. 2000;51:502–510. https://doi.org/10.1002/1521-4176(200007)51:7<502::AID-MACO502>3.0.CO;2-3
20. Ahmadkhaniha D., Mahboubi F. Effects of plasma

nitriding on properties of electroless Ni-B coating. Surface Engineering. 2012;28:195–198. https://doi.org/10.1179/1743294411Y.0000000058
21. Ghasemi A, Pouranvari M. Intermetallic phase formation during brazing of a nickel alloy using a Ni–Cr–Si–Fe–B quinary filler alloy. Science and Technology of Welding and Joining. 2018;23:342–351. https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1553280
22. Yong-xin Zhou, Jie Zhang, Zhi-guo Xing, Hai-dou Wang, Zhen-lin Lv. Microstructure and properties of NiCrBSi coating by plasma cladding on gray cast iron. Surface and Coatings Technology. 2019;361:270–279. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.12.055
23. Liang-Yu Chen, Haiyang Wang, Cuihua Zhao, Sheng Lu, Ze-Xin Wang, Jin Sha. Automatic remelting and enhanced mechanical performance of a plasma sprayed NiCrBSi coating. Surface and Coatings Technology. 2019;369:31–43. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.052

Критерии авторства

Нгуен Ван Чьеу получил и оформил научные результаты и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Nguyen Van Trieu has obtained and formalized the scientific results and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Нгуен Ван Чьеу,
аспирант,
Иркутский национальный
исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: vantrieu.xumuk@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Nguyen Van Trieu,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: vantrieu.xumuk@gmail.com

Оригинальная статья / Original article
УДК 629.113
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-64-76

Разработка тепловой модели тормозного диска фрикционного узла

© П.А. Поляков, Р.С. Тагиев, Е.С. Федотов, Е.А. Полякова, М.Б. Москаленко
Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия

Резюме: Цель – разработка тепловой модели тормозного диска фрикционного узла тормоза дисково-колодочного типа, представленной в качестве многослойного объекта. В процессе разработки тормозного диска необходимо спрогнозировать эксплуатационные параметры его конструкции в различных режимах работы. Периодически проводятся различные испытания, в которых критерием, определяющим параметром тормозного диска является максимальная достигнутая рабочая температура на поверхности металлического фрикционного элемента. Но тепловое состояние модели проектируемого диска не учитывает изменений, которые происходят в процессе эксплуатации, а именно – появление приповерхностных слоев на рабочей поверхности тормозного диска и на матовой поверхности вентиляционного аппарата. Процессы, происходящие в результате эксплуатации на рабочих поверхностях, приводят к изменению структуры в самом материале рабочей поверхности тормозного диска. В результате циклического нагрева на матовых поверхностях вентиляционного аппарата тормозного диска появляются окисление и ржавчина, что является фактором для пересмотра существующей тепловой модели расчета тормозного диска. На основании двух этих показателей тепловая модель тормозного диска рассматривалась в виде многослойного элемента. После разработки необходимых теоретических исследований использовали способ компьютерного моделирования (с помощью метода конечных элементов) на основе программного продукта ANSYS. Результатом исследований являются зависимость температуры в различных точках тормозного диска (рабочей поверхности металлического фрикционного элемента на матовой поверхности вентиляционного аппарата) и оценка эффективности работы вентиляционного аппарата тормозного диска. Из данных исследований можно делать вывод об эффективности отвода тепловой энергии от рабочих поверхностей тормозного диска посредством вентиляционного аппарата.

Ключевые слова: вентиляционный аппарат, коэффициент теплопередачи, тормозной диск, метод конечных элементов, тепловая модель, отвод тепловой энергии

Информация о статье: Дата поступления 08 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 12 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Поляков П.А., Тагиев Р.С., Федотов Е.С., Полякова Е.А., Москаленко М.Б. Разработка тепловой модели тормозного диска фрикционного узла. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2020. Т. 24. № 1. С. 64–76. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-64-76

Developing thermal model of friction assembly brake disc

Pavel A. Polyakov, Ruslan S. Tagiev, Evgeny S. Fedotov,
Elena A. Polyakova, Maxim B. Moskalenko
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to develop a thermal model of the brake disc of the disc-pad brake friction assembly and present it as a multi-layer object. While developing the brake disc, it is necessary to predict the performance parameters of its design in various operating modes. Various tests are carried out periodically, in which the maximum operating temperature reached on the surface of the metal friction element is a determining parameter of the brake disc. However, the thermal state of the model of the designed disc does not take into account the changes that occur in the operation process, namely, the origination of near-surface layers on the working surface of the brake disc and on the matte surface of the ventilation device. The processes that occur as a result of operation on working surfaces cause changes in the structure of the material of the brake disc working surface. Cyclic heating results in the appearance of oxidation and rust on the matte surfaces of the ventilation apparatus of the brake disc, which is a factor for revising the existing thermal model for brake disc calculation. These two indicators serve the basis for considering the thermal model of the brake disc as a multi-layer element. Having conducted all necessary theoretical studies, the computer simulation method (using the finite element method) based on the ANSYS software product is used. The result of the research is the dependence of the temperature in different points of the brake disc (the working surface of the metal friction element

on the matte surface of the ventilation device) and the evaluation of the brake disc ventilation device efficiency. Performed studies enable to derive a conclusion on the efficiency of heat removal from the brake disc working surfaces by means of a ventilation device.

Keywords: ventilation apparatus, heat transfer coefficient, brake disc, finite element method, thermal model, heat energy removal

Information about the article: Received November 08, 2019; accepted for publication December 12, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Polyakov PA, Tagiev RS, Fedotov ES, Polyakova EA, Moskalenko MB. Developing thermal model of friction assembly brake disc. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):64–76. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-64-76

1. ВВЕДЕНИЕ

В процессе торможения кинетическая и потенциальная энергии вращающегося диска превращаются в тепло. Большая часть этих энергий поглощается тормозным диском, а затем рассеивается в окружающую среду. Сплошные тормозные диски медленно рассеивают тепло. В настоящее время в большинстве случаев используют вентилируемые диски для улучшения охлаждения путем повышенной циркуляции воздуха [1–21].

Вентилируемый тормозной диск ведет себя как центробежный вентилятор, всасывая холодный воздух со стороны ступицы, проходящий через вентиляционный аппарат тормозного диска, и выпускает его обратно [4]. В исследованиях [6, 18] было отмечено, что дисковые тормоза имеют конвективный теплообмен и коэффициенты теплообмена примерно в два раза больше, чем у тормозов других типов.

На сегодняшний день проектирование фрикционного узла заключается в том, чтобы произвести расчет конструктивных и эксплуатационных параметров металлического фрикционного элемента (геометрические размеры тормозного диска, тормозной момент) [20], выполнить оценку напряженно-деформированного состояния [21]. Для дисково-колодочных тормозов расчет вентиляционного аппарата тормозного диска в большинстве случаев уходит на второй план и подбирается по справочникам. Если проектируемый фрикционный узел удовлетворяет расчетным требованиям (предел прочности, жесткость диска), на их основании выполняется прототип, который подвергается испытаниям в лабораторных и натурных условиях. Конструкторы пытаются предсказать поведение металлического фрикционного элемента в процессе эксплуатации [16]. К сожалению, проектировщики используют идеальные тепловые модели, которые не учитывают процессов, происходящих в процессе эксплуатации тормозного механизма (коррозия, циклический перегрев, изменение приповерхностных слоев в процессе трения) [14, 17]. В настоящее время появляются исследования, в которых разрабатываются модели взаимодействия рабочих пар фрикционных узлов различных типов (дисково-, барабанно- и ленточно-колодочные тормозные механизмы) [1, 5, 8, 11]. В современных исследованиях приводятся химические процессы, происходящие в материалах неметаллического фрикционного элемента [3, 9, 10]. Все эти исследования заслуживают внимания, но наиболее энергонагруженным является металлический элемент вне зависимости от типа пары трения (тормозной барабан, диск и шкив ленточно-колодочного тормоза).

Наиболее применяемым типом фрикционного узла в современной технике является дисково-колодочный тормозной механизм, но, несмотря на широкое его применение в технике и обилие научных публикаций [4, 6, 14], вентиляционный аппарат является темным пятном на проектном расчете фрикционного узла дисково-колодочного типа.

Анализ работы вентиляционного аппарата тормозного диска проводится при помощи тепловых моделей с использованием расчетного коэффициента теплопередачи [6], а также определения напряжений, обусловленных температурной нагруз-

кой. В большинстве исследований средний коэффициент теплообмена определялся экспериментально и составлял от 90 до 100 (Вт/м^2·К) [6, 11].

В исследовании [12] рассмотрен вопрос определения траекторий в паре трения, определяется геометрия охлаждающих каналов, оптимальных для охлаждения тормозов. В работах [13, 19] материалы и многодисковые тормозные механизмы представлены в качестве тепловой модели, в которых рассчитываются коэффициенты теплопередачи, но при этом отсутствует методика дальнейшего расчета конструктивных и эксплуатационных параметров тормоза. Разумно продолжать работу в этой области, проводить термодинамический анализ тормозного диска на основе разработки тепловой модели, которая учитывает распределение тепла с учетом термического сопротивления приповерхностных слоев тормозного диска. Этот метод позволяет сделать цифровой анализ как можно более точным; использует рассчитанные коэффициенты охлаждения для известных параметров диска и обеспечит более точные результаты теплового расчета во время торможения.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОБОСНОВАННОСТЬ РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ

Перед процессом моделирования методом конечных элементов необходимо подготовить теоретическую обоснованность разрабатываемой тепловой модели и привести алгоритм расчета. Оценка коэффициентов теплопередачи требует индивидуального рассмотрения механизмов теплопередачи, которые для тормозного диска включают в себя теплопроводность, конвекцию и излучение. Конвективный теплообмен тормозного диска является наиболее эффективным и разделяется на две области: первая включает конвекцию со всех внешних рабочих поверхностей тормозного диска, а вторая – через радиальные каналы вентиляционного аппарата.

Для расчета поверхностных температур рабочих областей тормозного диска и температур поверхности в вентиляционном аппарате необходимо определить коэффициенты теплопередачи и распределение тепловой энергии в паре трения [15]. На величину коэффициентов теплопередачи влияют термические сопротивления элементов трения тормоза и приповерхностные слои диска вентиляционных каналов, которые непосредственно принимают участие в теплообменных процессах. В процессе эксплуатации тормозной диск испытывает значительные циклические термические нагрузки, что приводит к появлению на матовых поверхностях слоя коррозии, а при перегреве образуется окалина. Все эти факторы затрудняют отвод тепла от матовых поверхностей вентиляционного аппарата тормозного диска, не говоря о том, что происходит уменьшение поперечного сечения вентиляционного канала. Аналогичным образом при постоянном воздействии фрикционных накладок на рабочую часть тормозного диска и циклическом подводе теплоты в структуре материала происходят необратимые изменения, такие как диффузия материалов фрикционной накладки в поверхность тормозного диска [3, 7]. На рис. 1 приведены общие закономерности изменения поверхностных температур элементов трения тормозного диска дисково-колодочного тормоза в зависимости от термического сопротивления по их толщине.

Представим закон Фурье в форме закона Ома в электротехнике, используя понятие «термическое сопротивление» неоднородной многослойной стенки с температурами поверхностей вентилируемого тормозного диска дисково-колодочного тормоза, получим значение теплового потока:

$$q(t) = \frac{t_{пр} - t_{пв}}{\sum_{i=1}^{n} R_i}, \qquad (1)$$

где $t_{пр}$, $t_{пв}$ – температуры приповерхностного слоя на рабочей поверхности тормозного

диска и приповерхностного слоя вентиляционного аппарата соответственно К; R_i – термическое сопротивление *i*-го слоя многослойной стенки, К/Вт.

$$\sum_{i=1}^{n} R_i = R_1 + R_2 + ... + R_n. \quad (2)$$

В свою очередь, термическое сопротивление слоя многослойной стенки равно

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (3)$$

где δ_i – толщина *i*-го слоя многослойной стенки, м; λ_i – коэффициент теплопроводности материала *i*-го слоя многослойной стенки, Вт/(м·К).

Используя зависимости (2) и (3), получим термическое сопротивление тормозного диска дисково-колодочного тормоза:

$$R = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}. \quad (4)$$

Анализ данных интенсивности теплообмена металлического элемента трения указывает на то, что коэффициенты теплоотдачи (α) существенно отличаются как по модулю, так и законом изменения в зависимости от линейной скорости тормозных дисков. Кроме того, поверхности вентиляционного аппарата (матовая) и рабочая тормозного диска омываются различными по термодинамическим параметрам средами.

С целью определения коэффициентов распределения тепловых потоков между элементами тормозного диска в процессе эксплуатации необходимо оценить интенсивность теплопередачи через них с учетом физико-химического состояния приповерхностного слоя тормозного диска и матовых поверхностей вентиляционного канала.

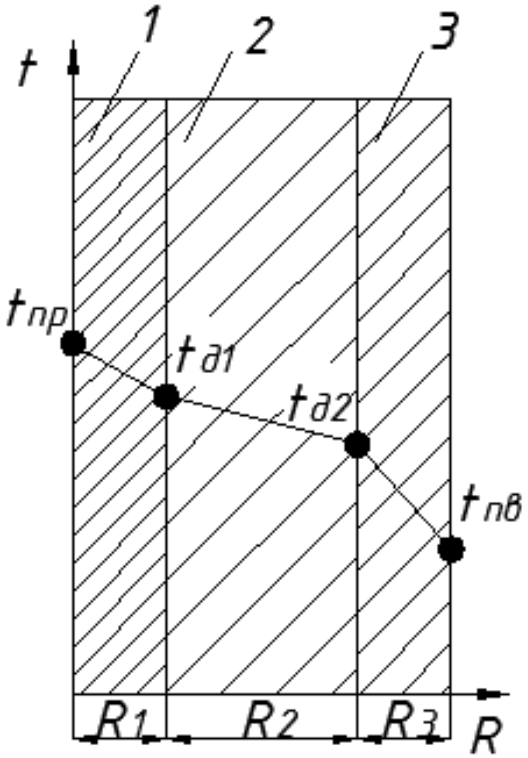


Рис. 1. Теплопроводность в материале тормозного диска: 1 – приповерхностный слой рабочей поверхности тормозного диска; 2 – тело тормозного диска; 3 – приповерхностный слой вентиляционного аппарата
Fig. 1. Thermal conductivity in brake disc material: 1 – near-surface layer of the brake disc working surface; 2 – body of the brake disc; 3 – near-surface layer of the ventilation apparatus

Коэффициент теплопередачи в тепловой модели, на которой базируются существующие проектировочные расчеты тормозного диска «воздух, проходящий через вентиляционный аппарат – тело тормозного диска – воздух, рабочие поверхности тормозного диска», определяется зависимостью вида:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_д}{\lambda_д} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (5)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от рабочей поверхности тормозного диска, Вт/(м^2·К); $\delta_д$ – толщина тормозного диска, м; $\lambda_д$ – коэффициент теплопередачи тормозного диска, Вт/(м^2·К); α_2 – коэффициент теплоотдачи от матовой поверхности тормозного диска, Вт/(м^2·К).

Коэффициент теплопередачи разработанной тепловой модели тормозного диска, рассчитываемый как для многослойной стенки, «воздух в вентиляционном аппарате – приповерхностный слой матовой поверхности в вентиляционном аппарате – тело тормозного диска – приповерхностный слой рабочей поверхности тормозного диска – приповерхностный слой омывающего воздуха – воздух, омывающий рабочую поверхность» определяется зависимостью вида:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \left(\frac{\delta_{пв}}{\lambda_{пв}} + \frac{\delta_д}{\lambda_д} + \frac{\delta_{пр}}{\lambda_{пр}} \right) + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (6)$$

где $\delta_{пв}$ – толщина приповерхностного слоя матовой поверхности вентиляционного аппарата тормозного диска, м; $\lambda_{пв}$ – коэффициент теплопередачи приповерхностного слоя матовой поверхности вентиляционного аппарата тормозного диска, Вт/(м^2·К); $\delta_{пр}$ – толщина приповерхностного слоя рабочей поверхности тормозного диска, м; $\lambda_{пв}$ – коэффициент теплопередачи приповерхностного слоя рабочей поверхности тормозного диска, Вт/(м^2·К).

Особенностью зависимости (6) является то, что она учитывает термическое сопротивление $\left(\frac{\delta_{пв}}{\lambda_{пв}}, \frac{\delta_{пр}}{\lambda_{пр}} \right)$ приповерхностных слоев матовой поверхности вентиляционного канала и приповерхностных слоев рабочей поверхности тормозного диска, от величины которого зависит направление теплового потока.

По значениям коэффициентов теплопередачи определим коэффициенты распределения теплоты между поверхностями охлаждения тормозного диска $\sigma_{тд}$ после процесса торможения:

$$\sigma_{тд} = \frac{\sum K'_{ср}}{\sum K'_{ср} + \sum K''_{ср}}, \quad (7)$$

где $K'_{ср}$ – коэффициент теплопередачи через поверхность тормозного диска, Вт/(м^2·К); $K''_{ср}$ – коэффициент теплопередачи через поверхность фрикционной накладки, Вт/(м^2·К).

Тепловой поток рассчитывали с использованием уравнения теплового баланса для фрикционного узла дисково-колодочного тормоза:

$$q(t) = \frac{N_{тор}}{A_{тр}} = \begin{cases} q = 2,7 \frac{Вт}{мм^2}, t_{пов} = 30°C \\ q = 0 \frac{Вт}{мм^2}, t_{пов} = t_{тд} \end{cases}, \quad (8)$$

где $N_{тор}$ – мощность торможения на каждой рабочей поверхности тормозного диска, Вт; $A_{тр}$ – площадь поверхности контакта тормозного диска с колодками, м^2.

В качестве граничных параметров моделируемого теплового потока в начале каждого торможения поверхностный тепловой поток составлял начальное значение 2,7 Вт/мм^2. Эта величина подводилась к рабочим поверхностям тормозного диска, которая линейно опускалась до 0 Вт/мм^2 при полной остановке тормозного диска. При этом температура на поверхности тормозного диска равна температуре окружающей среды в начале процесса торможе-

ния в первый раз, и выравнивалась по толщине к окончанию процесса торможения (прекращению подвода тепловой энергии к парам трения). При циклических торможениях температура на рабочей поверхности будет равна остаточной температуре от предыдущего цикла.

Мощность торможения рассчитывается по формуле:

$$N_{тор} = \frac{m_д \cdot \omega_н^{\,2} \cdot R_{ср}^2}{2t_{тор}}, \qquad (9)$$

где $m_д$ – масса тормозного диска, кг; $\omega_н$ – угловая скорость тормозного диска, с$^{-1}$; $R_{ср}$ – средний радиус приложения тормозной силы во фрикционном узле, м; $t_{тор}$ – время до полной остановки тормозного диска, с.

Зная геометрию тормозной колодки, можно вычислить площадь контакта колодки с диском:

$$A_{тр} = 2\pi \cdot \left(R_{внеш}^2 - R_{внут}^2 \right), \qquad (10)$$

где $R_{внеш}$ – наружный радиус площади контакта колодки с диском, м^2; $R_{внут}$ – внутренний радиус площади контакта колодки с диском, м^2.

Для определения температур приповерхностного слоя вентиляционного аппарата и приповерхностного слоя рабочей поверхности тормозного диска необходимо подставить в уравнение теплового баланса (8) зависимости (1) и (7):

$$t_{пр} = \frac{N_{тор}}{A_{тр} \cdot K^{'} \cdot \sigma_{тд}}, \qquad (11)$$

$$t_{пв} = \frac{N_{тор}}{A_{тр} \cdot K^{'} \cdot \left(1 - \sigma_{тд}\right)}. \qquad (12)$$

Анализируя зависимости (11), (12) можно сделать предположение, что тепловая модель учитывает коэффициенты распределения теплового потока в тормозном диске, помимо этого учитываются приповерхностные слои на рабочих поверхностях тормозного диска и на поверхности вентиляционного аппарата. Это условие позволяет использовать тепловую модель для оценки тормозного диска в процессе его длительной эксплуатации. Тепловой поток имеет наибольшее значение в начале торможения и затем линейно падает до 0 в конце торможения, что учитывает наступление термостабилизационного состояния в процессе выравнивания температур рабочей и матовой поверхностей. Цикл повторяется, когда автомобиль снова тормозит. Этот фактор отвечает в пользу актуальности разработанной тепловой модели.

3. ПРОЦЕСС МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

На основании разработанной тепловой модели можно перейти к моделированию в программном пакете ANSYS CFX. Коэффициенты теплопередачи использовались в тепловом расчете с учетом конвективного теплообмена рабочих матовых поверхностей. Угловая скорость тормозного диска изменялась от 100 до 1000 об/мин, а значения температуры изменялись с шагом 50–400°C.

Конструкция и основные размеры тормозного диска показаны на рис. 2. Тормозной диск имеет 41 охлаждающую лопасть на одинаковом расстоянии, что позволяет использовать симметрию с основным углом 8,78°. Трехмерная модель с тремя охлаждающими лопастями была выбрана для метода конечных элементов, что означает, что 3D-модель имеет участок, содержащий угол 26,34°.

Модель для расчета представляет собой 26,34° область секции тормозного диска с четырехкратной высотой тормозного диска и трехкратным радиусом диска, как показано на рис. 3. Наиболее важной областью модели является вентиляционный аппарат, сетка была построена таким образом, чтобы обеспечить лучшее качество модели в этой области. Использовался метод полигональной сетки, который дал 649272 полигона и 125091 треугольник.

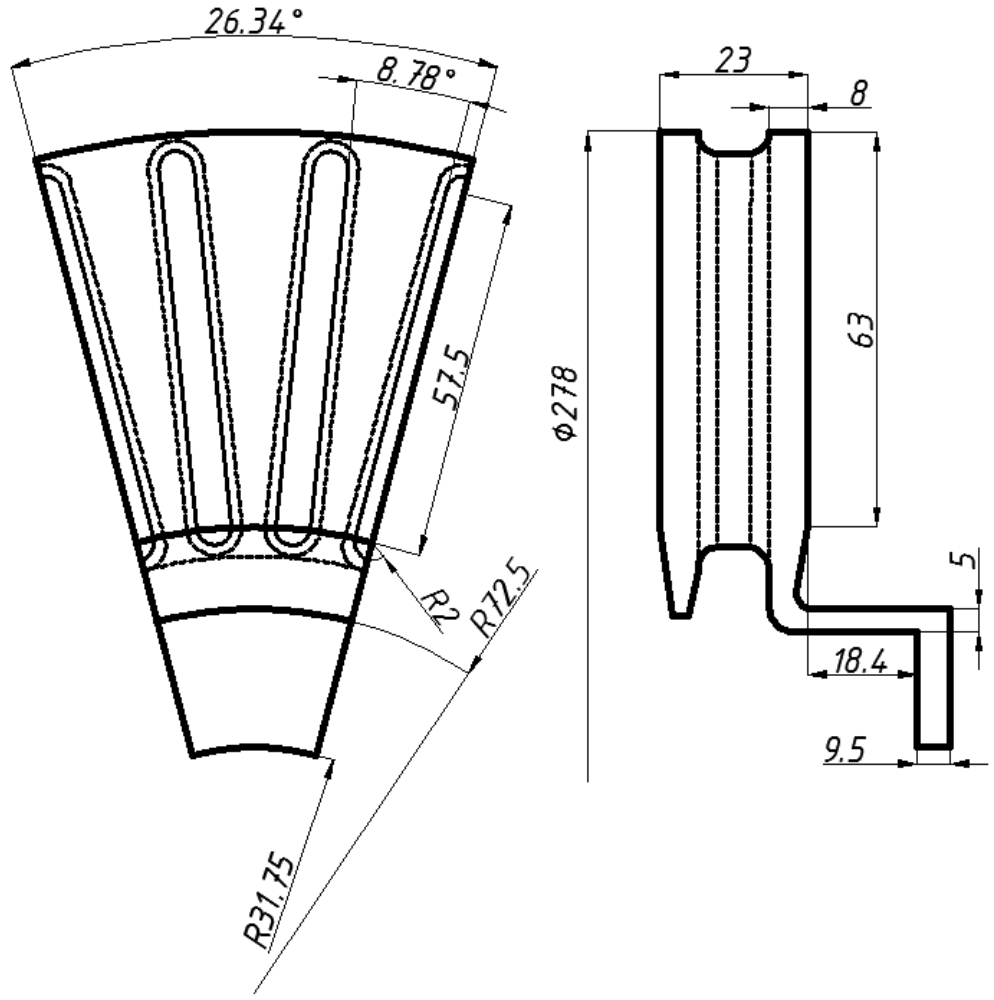


Рис. 2. Основные геометрические размеры анализируемого сектора тормозного диска
Fig. 2. Main geometrical dimensions of the analyzed sector of the brake disc

Для моделирования методом конечных элементов были приняты следующие ограничения: шероховатость поверхности принимается равной 100 мкм; поверхности диска нагревались равномерно; модель диска прикреплена к адиабатической вращающейся оси; температура воздуха вокруг диска принята 30°С; система отсчета угловых скоростей принималась относительно оси диска.

В аналогичных работах [4] интенсивность турбулентности была установлена на минимальное значение (из-за относительно медленной скорости потока омывающего воздуха). Эффектом текучести пренебрегали, потому что воздушное «насосное» действие тормозного диска почти полностью зависит от самого вращения тормозного диска.

Тормозной диск симметричен, поэтому был смоделирован только сектор, содержащий угол 26,34°. Данные, зависящие от температуры, были определены для серого литого чугуна Gh190. Большое внимание уделялось точности построения полигональной сетки, насколько это возможно. Поэтому все мелкие скругления были удалены из модели, а более важные – заменены фаской. Сетка (полисетка) получилась из 3 отдельных частей (рабочая поверхность диска, свободная поверхность диска и лопасти), показана на рис. 4. Охлаждение происходит из-за тепловой конвекции с моделированием состояния теплопередачи. Коэффициент теплопередачи рассчитывался на основании зависимостей (1) и (2), в которых он обусловлен толщиной приповерхностных слоев, тела тормозного

ISSN 1814-3520

диска и его угловой скорости вращения. Диск разделен на две области: охлаждаемая воздушным потоком рабочая поверхность и вентиляционный аппарат. Изначально температура окружающего воздуха задавалась равной 30ºС, а начальная температура тормозного диска составляла 100ºС, как определено стандартом ЕЭК ООН № 13[1].

Боковая грань смоделированного сектора адиабатична и симметрична для сторон диска. Усредненный тепловой поток был принят постоянным в радиальном направлении диска. Моделированные тормозные колодки имели внешний диаметр, который на 0,5 мм меньше внешнего диаметра моделируемого тормозного диска и на 12 мм больше внутреннего. Тепловой поток принимался «постоянным» в радиальном направлении для упрощения анализа. Поверхностный тепловой поток, подводимый к тормозному диску, из-за торможения фрикционного узла рассчитывался с учетом энергии вращающего тела.

Места измерения температуры представлены в точках на тормозном диске, которые показаны на рис. 4.

На рис. 5 показана зависимость измерения температур от времени торможения в различных точках тормозного диска. В точках рабочей поверхности тормозного диска температура имела постоянный прирост. Она увеличивалась при контакте пар трения, а затем падала при размыкании контакта фрикционного узла, когда температура распределялась по площади и толщине тормозного диска. Точки, расположенные на матовой поверхности вентиляционного аппарата, не повторяли эту зависимость, а, наоборот, наблюдалось непрерывное повышение температуры.

Анализируя рис. 5, можно сделать вывод, что при более высоких температурах тормозного диска охлаждение рабочих поверхностей диска становится более интенсивным, а падение температуры на конец фазы торможения – более стремительным. График температуры не является линейным и имеет дугообразную форму в результате охлаждения. При продолжении тормозных циклов, выполняя их с таким же ростом температуры, получили бы 25% отказов торможения при термостабилизационном состоянии.

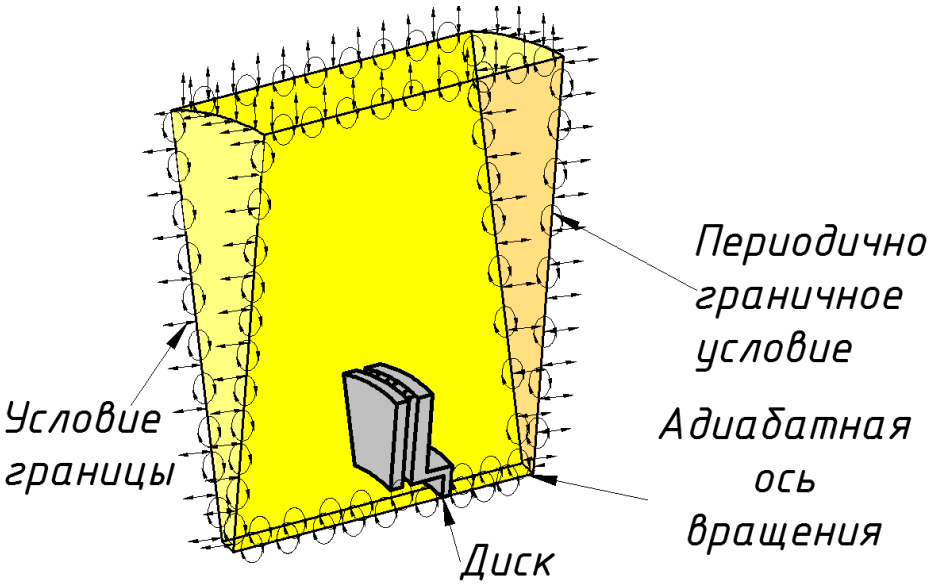


Рис. 3. Граничные условия для метода конечных элементов
Fig. 3. Boundary conditions for finite element method

[1]Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств категорий M, N и O в отношении торможения: правила ЕЭК ООН № 13 от 11.07.2008 г., изм. 18.11.2012 г.

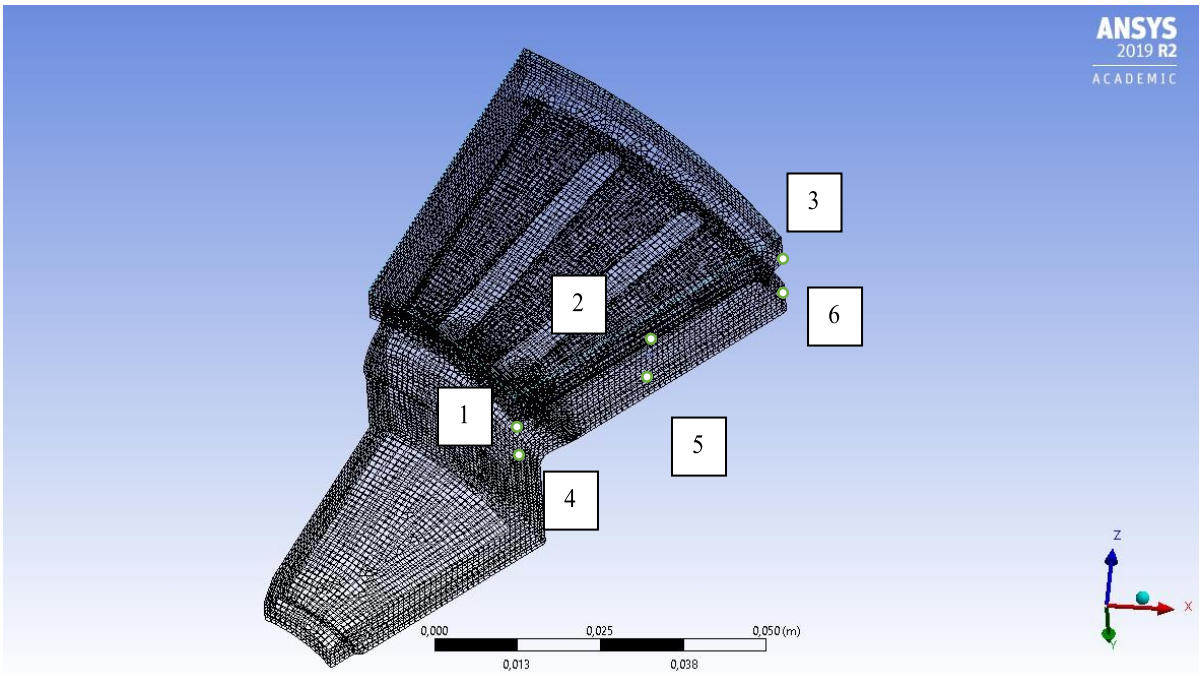


Рис. 4. Точки для температурного графика
Fig. 4. Points for temperature chart

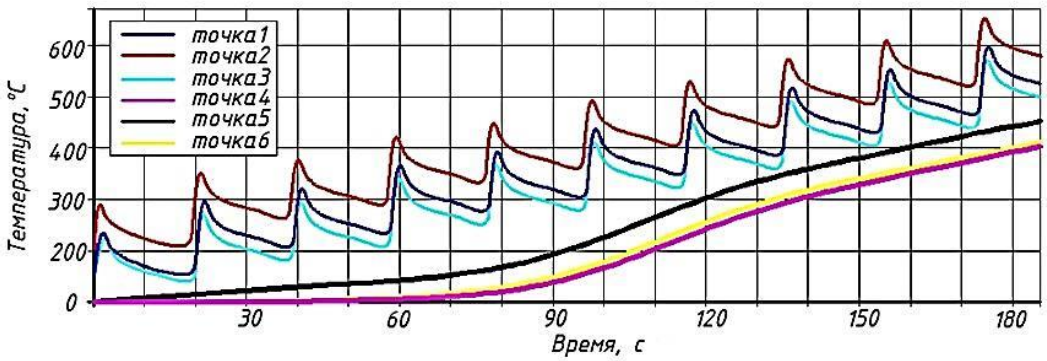


Рис. 5. График изменения температуры цифрового моделирования с учетом охлаждения
Fig. 5. Graph of digital simulation temperature variation considering cooling

Анализ данных показал, что при изменении теплового состояния тормозного диска в диапазоне от 90 до 180 с интенсивность роста температур на матовой поверхности вентиляционного аппарата увеличивается, что свидетельствует о снижении отвода теплоты от поверхностей вентиляционного аппарата. Разработанная тепловая модель, учитывающая термическое сопротивление приповерхностных слоев, показывает время наступления термостабилизационного состояния и несостоятельность существующих методов проектирования вентиляционного аппарата тормозных дисков. Помимо этого разработанная тепловая модель фрикционного узла позволяет оценить эффективность работы вентиляционного аппарата в процессе эксплуатации в зависимости от режимов нагружения.

После постоянных циклических термических нагрузок, превышающих допустимые температуры, на рабочих поверхностях тормозного диска могут образовываться трещины. На рис. 6 представлен тормозной диск с трещинами в результате перегрева.



Рис. 6. Микротрещины на поверхности диска
Fig. 6. Microcracks on disc surface

Трещины распространяются в радиальном направлении тормозного диска, поскольку охлаждающие лопасти ориентированы в том же направлении.

Подверженные охлаждению области имеют лучшую проводимость воздуха по сравнению с областями, создаваемыми вентилируемыми каналами, которые не охлаждаются воздушным потоком. Это приводит к различиям в температуре, которые вызывают образование трещин из-за экстремальных термических нагрузок и трения.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимо проектировать тормозной диск таким образом, чтобы вентиляционный аппарат работал эффективнее и не позволял наступать термостабилизационному состоянию. Целесообразно сделать вывод о том, что разработанная тепловая модель тормозного диска (как многослойного объекта) указывает на неэффективность существующих методов проектирования и создания современных вентилируемых тормозных дисков.

Библиографический список

1. Volchenko N.A., Volchenko D.A., Polyakov P.A., Fedotov E.S., Evchenko A.S. Pulse-contact frictional interaction of microprotrusions of friction pairs of brake devices // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 560. P. 012194. [Электронный ресурс]. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/560/1/012194/pdf (21.02.2019). https://doi.org/10.1088/1757-899x/560/1/012194

2. Вольченко А.И., Возный А.В., Стадник О.Б., Поляков П.А., Красин П.С. Энергонагруженность трибосопряжений дисково-колодочных тормозов транспортных средств // Сфера знаний: вопросы современного этапа развития научной мысли: сб. статей. Казань: Изд-во «СитИвент», 2018. С. 396–410.

3. Volchenko N.A., Krasin P.S., Volchenko D.A., Voznyi A.V. Electrochemistry with double electrical layers in frictional interaction metal-polymer tribolink // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2018. Vol. 327. P. 032059. [Электронный ресурс]. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/327/3/032059 (21.02.2019). https://doi.org/10.1088/1757-899x/327/3/032059

4. Вольченко Н.А., Поляков П.А., Полякова Е.А., Федотов Е.С. Исследование конструкции системы охлаждения фрикционных узлов тормозных механизмов // Механика, оборудование, материалы и технологии: сб. науч. статей по материалам междунар. науч.-практич. конф., посвященной 100-летию ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (г. Краснодар, 29–30 марта 2018 г.). Краснодар: Изд-во: ООО «ПринтТерра», 2018. С. 147–160.

5. Вольченко А.И., Скрипник В.С., Витвицкий В.С., Федотов Е.С., Вудвуд А.Н. Энергонагруженность дисково-колодочных тормозов с жидкостным охлаждением транспортных средств // Механика, оборудование, материалы и технологии: сб. науч. статей по материалам Междунар. науч.-практ. конф. (г. Краснодар, 29–30 октября 2019 г.). Краснодар: Изд-

во «Принт-Терра», 2019. С. 575–583.
6. Volchenko N., Volchenko A., Volchenko D., Polyakov P., Malyk V., Zhuravlev D., Vitwickbq V., Krasin P. Features of the estimation of the intensity of heat exchange in selfventilated disc-shoe brakes of vehicles // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 1. No. 5. P. 154712. https://doi.org/https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154712
7. Kindrachuk M.V., Vol'chenko D.A., Vol'chenko N.A., Stebeletskaya N.M., Voznyi A.V. Influence of hydrogen on the wear resistance of materials in the friction couples of braking units // Materials Science. 2017. Vol. 53. P. 282–288. https://doi.org/10.1007/s11003-017-0073-z
8. Kindrachuk M.V., Vol'chenko A.I., Vol'chenko D.A., Zhuravlev D.Yu., Chufus V.M. Electrodynamics of the thermal contact friction interaction in metal-polymer friction couples // Materials Science. 2018. Vol. 54. Issue 1. P. 69–77. https://doi.org/10.1007/s11003-018-0159-2
9. Kindrachuk M, Volchenko A., Volchenko D, Volchenko N., Poliakov P, Tisov O, et al. Polymeres with enhanced energy capacity modified by semiconductor materials // Functional Materials. 2019. Vol. 26. No. 3. P. 629–634. https://doi.org/10.15407/fm26.03.629
10. Kindrachuk M.V., Volchenko O.I., Volchenko D.O., Volchenko N.O., Poliakov P.A., Kornienko A.O., et al. Polymeric materials modified by semiconductor substances in friction units of braking devices // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2019. Vol. 11. No. 3. P. 03014. https://doi.org/10.21272/jnep.11(3).03014
11. Вольченко Н.А., Поляков П.А. Нанотрибология при взаимодействии поверхностных слоев пар трения барабанно-колодочных тормозов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. Т. 1. № 1. С. 41–47.
12. Вольченко Н.А., Поляков П.А., Гороть Е.В. Математическое моделирование траекторий омывающего воздуха пары трения тормоза барабанно-колодочного тормоза транспортного средства // Вісник СевНТУ. 2012. № 135. С. 233–236.
13. Тугов В.В., Акимов И.А. Разработка математических моделей теплопередачи в многослойных конструкциях // Фундаментальные исследования. 2017. № 8-2. С. 320–324.
14. Тарасик В.П. Математическая модель теплопередачи в дисковых фрикционах трансмиссий мобильных машин // Вестник Белорусско-Российского университета. 2015. № 3. С. 68–78.
15. Баринов Д.Я., Просунцов П.В. Моделирование теплопереноса в слое разлагающегося материала теплозащитного покрытия спускаемого аппарата // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2016. № 6 С. 22–32. https://doi.org/10.18698/0236-3941-2016-6-22-32
16. Войтенко В.А. Комплексная модель тепловых процессов и процессов изнашивания в дисковом тормозе с плавающей тормозной колодкой // Инновационный транспорт. 2018. № 3. С. 58–65. https://doi.org/10.20291/2311-164X-2018-3-58-65
17. Миронов Д.О. Компьютерное моделирование кинетики тепловых процессов в элементах дискового тормоза // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 8. Ч. 3. С. 68–72. https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.50.145
18. Моисеенко М.А. Анализ нагруженности деталей дискового тормоза скоростного вагона // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 2. 4 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.science-education.ru/102-5906 (28.02.2019).
19. Юдин Е.Г. Трибологическая надежность фрикционных узлов трансмиссий транспортных машин // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2004. № 2. С. 3–23.
20. Поляков П.А., Федотов Е.С., Полякова Е.А. Метод проектирования современных тормозных механизмов с сервоусилением // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 7. С. 39–50. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-7-39-50
21. Тагиев Р.С., Поляков П.А., Федотов Е.С., Дурапов А.Н. Исследование напряжений во фрикционном узле дисково-колодочном тормозе // Механика, оборудование, материалы и технологии: сб. науч. статей по материалам Междунар. науч.-практ. конф. (г. Краснодар, 23–30 октября 2019 г.). Краснодар: Изд-во «Принт Терра», 2019. С. 747–752.

References

1. Volchenko NA, Volchenko DA, Polyakov PA, Fedotov ES, Evchenko AS. Pulse-contact frictional interaction of microprotrusions of friction pairs of brake devices. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series.* 2019, vol. 560, p. 012194. Available from: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/560/1/012194/pdf [Accessed 21st February 2019]. https://doi.org/10.1088/1757-899x/560/1/012194
2. Vol'chenko AI, Voznyj AV, Stadnik OB, Polyakov PA, Krasin PS. Energy loading of tribo-couplings of vehicle disc-block brakes. In: *Sfera znanij: voprosy sovremennogo etapa razvitiya nauchnoj mysli* = Field of knowledge: issues of modern development stage of scientific thought. Kazan': SitIvent; 2018, p. 396–410. (In Russ.)
3. Volchenko NA, Krasin PS, Volchenko DA, Voznyi AV. Electrochemistry with double electrical layers in frictional interaction metal-polymer tribolink. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series.* 2018. Vol. 327. P. 032059. Available from: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/327/3/032059 [Accessed 21st February 2019].

https://doi.org/10.1088/1757-899x/327/3/032059
4. Vol'chenko NA, Polyakov PA, Polyakova EA, Fedotov ES. Studying design of brake mechanism friction assembly cooling system. *Mehanika, oborudovanie, materialy i tehnologii: sbornik nauchnyh statej po materialam mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, posvyashchennoj 100-letiyu "Kubanskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet"* = Mechanics, Equipment, Materials and Technologies: Collected scientific articles on the materials of the International scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of Kuban State Technological University. 29–30 March 2018, Krasnodar. Krasnodar: PrintTerra; 2018, p. 147–160. (In Russ.)
5. Vol'chenko AI, Skripnik VS, Vitvickij VS, Fedotov ES, Vudvud AN. Energy load of vehicle disc-pad brakes with liquid cooling. *Mehanika, oborudovanie, materialy i tehnologii: sbornik nauchnyh statej po materialam mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* = Mechanics, Equipment, Materials and Technologies: Collected scientific articles on the materials of the International scientific and practical conference. 29–30 October 2019, Krasnodar. Krasnodar: Print-Terra; 2019, p. 575–583. (In Russ.)
6. Volchenko N, Volchenko A, Volchenko D, Polyakov P, Malyk V, Zhuravlev D, Vitwickbq V, Krasin P. Features of the estimation of the intensity of heat exchange in self-ventilated disc-shoe brakes of vehicles. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019;1(5):154712. https://doi.org/https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154712
7. Kindrachuk MV, Vol'chenko DA, Vol'chenko NA, Stebeletskaya NM, Voznyi AV. influence of hydrogen on the wear resistance of materials in the friction couples of braking units. Materials Science. 2017;53:282–288. https://doi.org/10.1007/s11003-017-0073-z
8. Kindrachuk MV, Vol'chenko AI, Vol'chenko DA, Zhuravlev DYu, Chufus VM. Elec-trodynamics of the thermal contact friction interaction in metal-polymer friction couples. Materials Science. 2018;54(1):69–77. https://doi.org/10.1007/s11003-018-0159-2
9. Kindrachuk M, Volchenko A, Volchenko D, Volchenko N, Poliakov P, Tisov O, et al. Polymeres with enhanced energy capacity modified by semiconductor materials. Functional Materials. 2019;26(3):629–634. https://doi.org/10.15407/fm26.03.629
10. Kindrachuk MV, Volchenko OI, Vol'chenko DO, Volchenko NO, Poliakov PA, Kornienko AO, et al. Polymeric materials modified by semiconductor substances in friction units of braking devices. Journal of Nano- and Electronic Physics. 2019;11(3):03014. https://doi.org/10.21272/jnep.11(3).03014
11. Volchenko NA, Polyakov PA. Nanotribology under the interaction of the surface layers of friction pairs in drum brakes. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Vestnik Saratov State Technical University. 2012;1(1):41–47. (In Russ.)
12. Volchenko NA, Polykov PA, Gorot EV. Mathematical design of trajectories of washing air of pair of friction of brake of drum-shoe brake of transport vehicle. *Vestnik Sevastopol'skogo nacional'nogo tehnicheskogo universiteta* = Bulletin of Sevastopol National Technical University. 2012;135:233–236.
13. Tugov VV, Akimov IA. Development of mathematical models of heat transfer in multilayer structures. *Fundamental'nye issledovaniya* = Fundamental Research. 2017;8-2:320–324. (In Russ.)
14. Tarasik VP. Mathematical model of heat transfer in disc-type friction clutches of mobile machines transmissions. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta* = Bulletin of Belarusian-Russian University. 2015;3:68–78.
15. Barinov DYa, Prosuncov PV. Modeling of heat transfer in decomposable materials of thermal protection coating of reentry vehicle. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie* = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering. 2016;6:22–32. https://doi.org/10.18698/0236-3941-2016-6-22-32
16. Vojtenko VA. Integrated model of thermal processes and wear processes in a disc brake with a floating brake shoe. *Innovacionnyj transport* = Innotrans. 2018;3:58–65. (In Russ.) https://doi.org/10.20291/2311-164X-2018-3-58-65
17. Mironov DO. Computer simulation of the kinetics of thermal processes in the cell disc brakes. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* = International research Journal. 2016;8-3:68–72. (In Russ.) https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.50.145
18. Moiseenko MA. Analysis of high-speed carriage disc brake details loading. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern problems of science and education. 2012;2:4. Available from: http://www.science-education.ru/102-5906 [Accessed 28th February 2019]. (In Russ.)
19. Yudin EG. Tribological reliability of friction units of transport vehicle transmissions. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie* = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering. 2004;2:3–23. (In Russ.)
20. Polyakov PA, Fedotov ES, Polyakova EA. Design method of modern servo-assisted brake mechanisms. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2017;21(7):39–50. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-7-39-50
21. Tagiev RS, Polyakov PA, Fedotov ES, Durapov AN. Study of stresses in the friction unit of the disc-pad brake. In: *Mehanika, oborudovanie, materialy i tehnologii: sbornik nauchnyh statej po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* = Mechanics, Equipment, Materials and Technologies: Collected scientific articles on the materials of the International scientific and practical conference. 23–30 October 2019, Krasnodar: Print Terra; 2019, p. 747–752. (In Russ.)

Критерии авторства

Поляков П.А., Тагиев Р.С., Федотов Е.С., Полякова Е.А., Москаленко М.Б. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Authorship criteria

Polyakov P.A., Tagiev R.S., Fedotov E.S., Polyakova E.A., Moskalenko M.B. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Поляков Павел Александрович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры автосервиса и материаловедения,
Кубанский государственный технологический университет,
350062, г. Краснодар, ул. Московская, 2, Россия;
e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

Тагиев Руслан Суфудинович,
старший преподаватель кафедры автосервиса и материаловедения,
Кубанский государственный технологический университет,
350062, г. Краснодар, ул. Московская, 2, Россия;
e-mail: usytagiev@mail.ru

Федотов Евгений Сергеевич,
старший преподаватель кафедры автосервиса и материаловедения,
Кубанский государственный технологический университет,
350062, г. Краснодар, ул. Московская, 2, Россия;
e-mail: avtoru2009@mail.ru

Полякова Елена Александровна,
ассистент кафедры прикладной математики по направлению «Математика. Компьютерные науки»,
Кубанский государственный технологический университет,
350062, г. Краснодар, ул. Московская, 2, Россия;
e-mail: polyakova_ellen@mail.ru

Москаленко Максим Борисович,
студент,
Кубанский государственный технологический университет,
350062, г. Краснодар, ул. Московская, 2, Россия;
✉ e-mail: moskalenko.12@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pavel A. Polyakov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Car Service and Materials Science,
Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya St., Krasnodar 350062, Russia,
e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

Ruslan S. Tagiev,
Senior Lecturer of the Department of Car Service and Materials Science,
Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya St., Krasnodar 350062, Russia,
e-mail: usytagiev@mail.ru

Evgeny S. Fedotov,
Senior Lecturer of the Department of Car Service and Materials Science,
Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya St., Krasnodar 350062, Russia,
e-mail: avtoru2009@mail.ru

Elena A. Polyakova,
Assistant Professor of the Department of Applied Mathematics in the direction of 'Mathematics. Computer Science',
Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya St., Krasnodar 350062, Russia,
e-mail: polyakova_ellen@mail.ru

Maxim B. Moskalenko,
Student,
Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya St., Krasnodar 350062, Russia,
✉ e-mail: moskalenko.12@bk.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.923.1
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-77-84

Выбор оптимальной характеристики высокопористых нитридборовых кругов при плоском шлифовании вспомогательного производства самолетостроительных предприятий

© Я.И. Солер, А.И. Шустов
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – исследование параметров микро- и макрогеометрии поверхности быстрорежущих пластин Р9М4К8 при шлифовании высокопористыми кругами из кубического нитрида бора. Для оценки качества шлифованной поверхности выбраны параметры *Ra* (среднее арифметическое отклонение профиля), *Sm* (средний шаг неровностей профиля) (микроотклонения) и EFE_{max} (отклонение от плоскостности) (макроотклонения). Оценка качества велась с использованием ожидаемых медиан вместе с категориальными величинами для параметров шероховатости и степенью точности для макроотклонений. Выполнен анализ стабильности формирования этих параметров. Оценка стабильности велась с использованием квартильных широт непраметрического метода статистики. Обосновано применение высокопористых кругов из кубического нитрида бора для шлифования сложнолегированных быстрорежущих сталей. Данные круги позволяют снизить температуру в зоне резания и увеличить производительность процесса шлифования. Показана целесообразность применения теоретико-вероятностных методов при оценке процесса шлифования быстрорежущих пластин. В принятых технологических условиях выбран непараметрический метод статистики, для которого наблюдения оказались «своим полем». Для оценки качества шлифованных пластин выбран непараметрический метод статистики. Подтверждено влияние проницаемости высокопористых кругов из кубического нитрида бора на стабильность процесса. Даны технологические рекомендации по выбору размеров пор высокопористых кругов из кубического нитрида бора. Порообразователь КФ40 превосходит по воспроизводимости процесса порообразователь КФ25. Наилучшее качество быстрорежущих пластин Р9М4К8 и высокая стабильность его формирования установлены при шлифовании кругом CBN30 B126 100 L V K27 КФ40. При шлифовании данным инструментом достигаются следующие параметры качества поверхности: *Ra* 0,29(0,32), *Sm* 79,00(80), EFE_{max} 11,50(7).

Ключевые слова: шлифование, поры круга, шероховатость, медиана, мера положения, мера рассеяния

Информация о статье: Дата поступления 04 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 27 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Солер Я.И., Шустов А.И. Выбор оптимальной характеристики высокопористых нитридборовых кругов при плоском шлифовании вспомогательного производства самолетостроительных предприятий. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 1. С. 77–84. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-77-84

Search for optimal characteristic of high porosity nitride boron wheels under aircraft factory auxiliary process flat grinding

Yakov I. Soler, Andrey I. Shustov
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to study the parameters of surface micro- and macro-geometry of high-speed R9M4K8 plates when grinding by high-porosity wheels made of cubic boron nitride. The quality of the ground surface is estimated using the following selected parameters: *Ra* (arithmetic mean of profile deviation), *Sm* (average pitch of profile irregularities – micro-deviations) and EFE_{max} (flatness deviation – macro-deviations). Quality is assessed using the expected medians along with the categorical values for the roughness parameters and the accuracy degree for macro-deviations. The formation stability of these parameters is analyzed. Stability is assessed using the quartile latitudes of the non-parametric statistical method. The application of high-porosity wheels made of cubic boron nitride for grinding complex alloyed high-speed steels is justified. These wheels allow to reduce the temperature in the cutting zone and improve grinding efficiency. The expediency of using the probability-theoretic methods for evaluating the high-speed plate grind-

ing is shown. A nonparametric statistical method, for which observations turned out to be "their own field" is chosen in the accepted technological conditions. The quality of the ground plates is evaluated by means of the nonparametric statistical method. The influence of high-porosity CBN wheel permeability on process stability is confirmed. Technological recommendations for selecting the pore sizes of high-porosity CBN wheels are given. The pore former KF40 surpasses the pore former KF25 in process reproducibility. Grinding by the wheel CBN30 B126 100 L V K27 KF40 ensures the best quality of R9M4K8 high-speed inserts and demonstrates its high formation stability. When grinding with this tool, the following surface quality parameters are achieved: *Ra* 0.29 (0.32), *Sm* 79.00 (80), EFE_{max} 11.50 (7).

Keywords: grinding, wheel pores, roughness, median, measure of position, measure of dispersion

Information about the article: Received November 04, 2019; accepted for publication December 27, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Soler YaI, Shustov AI. Search for optimal characteristic of high porosity nitride boron wheels under aircraft factory auxiliary process flat grinding. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):77–84. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-77-84

1. ВВЕДЕНИЕ

Изготовление качественного режущего инструмента – одно из важных условий производства конкурентоспособной продукции в машиностроении. Основная масса инструмента изготавливается из быстрорежущей стали. Быстрорежущие пластины (БП) эффективны при обработке ответственных деталей летательных аппаратов.

Качество БП оказывает прямое влияние на эксплуатационные характеристики деталей самолета и их соединений. Таким образом, среднее арифметическое отклонение профиля *Ra* является одним из наиболее важных для деталей, работающих в условиях изнашивания [1, 12, 16, 17], а уменьшение среднего шага микронеровностей *Sm* и максимальных макроотклонений EFE_{max} оказывает основное влияние на увеличение контактной жесткости [2, 18, 20].

Основная проблема при шлифовании БП – повышенное содержание легирующих элементов в составе высоколегированных сталей. Это не позволяет применять при их шлифовании круги из традиционных абразивов (алмаз, электрокорунд) [13]. Быстрая потеря режущей способности традиционных кругов и прижоги на поверхности БП препятствуют изготовлению режущего инструмента с большим периодом стойкости. Решением этой проблемы стали высокопористые круги (ВПК) на основе зерен из кубического нитрида бора (КНБ). При шлифовании кругами с зернами из КНБ [3, 14] значительно снижаются температуры в зоне резания и износ. Повышается качество шлифованной поверхности, а производительность процесса увеличивается на 65–70% [4]. На снижение температуры в зоне шлифования главным образом влияет размер пор, в которых при действии центробежных сил создается вакуум и, как следствие, возникает подсасывание СОЖ, которая затем выбрасывается в зону шлифования. Влияние размера пор круга на его проницаемость (способность пропускать через себя жидкость под действием градиента давления) установлено в работе [5].

2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе оценку режущих свойств ВПК из КНБ с различным порообразующим вели с позиции минимизации параметров качества поверхности БП и наибольшей стабильности процесса шлифования.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе использованы теоретико-вероятностные подходы, применение которых обусловлено случайным характером геометрической формы зерен, их расположением на режущей поверхности ВПК, а также разновысотностью зерен в радиальном и осевом направлениях. Геометрию зерен, их суммарное количество и толщину срезаемого материала следует рассматривать случайными величинами. Для оптими-

зации вычислений и уменьшения ошибок использована программа Statistica 6.1.478.0. При использовании статистики для оценки экспериментальных данных необходимо представить их в виде множеств $e=\overline{1;k}$:

$$\{y_{dev}\}, v=\overline{1;n}, \quad (1)$$

где v – количество параллельных опытов, которые целесообразно проводить с одинаковым n. В данной работе количество параллельных наблюдений n = 30. Методика интерпретации экспериментальных данных с использованием методов статистики приведена в работах [6–8]. Установлено, что множество наблюдений (1) не удовлетворяет требованиям гомоскедастичности и нормальности распределений. Это предопределяет привлечение непараметрического метода. Статистические методы позволяют предсказать следующую информацию для (1)[1] [9, 10, 15, 19], ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002[2].

По мерам положения (опорным значениям):

– средним

$$\overline{y}_{de}=y_{de}; \quad (2)$$

– медианам

$$\tilde{y}_{de}. \quad (3)$$

По мерам рассеяния (прецизионности):

– стандартам отклонений

$$SD_{de}; \quad (4)$$

– размахам

$$R_{de}=\left(y_{\max}-y_{\min}\right)_{de}; \quad (5)$$

– квартильным широтам

$$КШ_{de}=\left(y_{0,75}-y_{0,25}\right)_{de}. \quad (6)$$

На частотах (2), (4) базируется параметрический метод, а на (3), (5), (6) – ранговые статистики.

Условия эксперимента: плоскошлифовальный станок модели 3Е711В; форма и размеры кругов (ГОСТ Р 53923-2010[3]): 1А1 200×20×76×3; БП из стали Р9М4К8 (63–64 *HRC*); схема шлифования – периферией круга без выхаживающих ходов; технологические параметры: скорость абразивного инструмента $v_к$ = 28 м/с, продольная подача $s_{пр}$ = 6 м/мин, поперечная подача $s_п$ = 4 мм/дв.ход, глубина резания t = 0,01 мм, операционный припуск z = 0,1 мм. СОЖ – 5% эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-00148845-98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7–10 л/мин. БП – образцы с размерами $D\times L$ = 40×30 мм, шлифуемые по торцу на магнитном столе станка.

Параметры качества шлифованной поверхности – Ra_{de} и Sm_{de} (ГОСТ 2789-73[4]) – измерены на профилографе-профилометре модели 252 завода «Калибр». Выходные данные процесса представлены в общем виде как y_{dev}, где индекс $d=\overline{1;2}$ – направление расположения микронеровностей: 1 – параллельно вектору поперечной подачи $s_п$, 2 – параллельно вектору $s_{пр}$; $e=\overline{1;2}$ – код ВПК из КНБ: 1 – CBN30 B126 100 L V K27 100 КФ25 (базо-

[1]Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики / пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1982. 344 с.
[2]ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений. Введ. Постановлением госстандарта России № 161-ст от 23.04.2002. М.: Изд-во стандартов, 2002. 58 с.
[3]ГОСТ Р 53923-2010. Круги алмазные и из кубического нитрида бора (эльбора) шлифовальные. Технические условия. Введ. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 398-ст от 12.11.2010. М.: Стандартинформ, 2011.

вый), 2 – CBN30 B126 100 L V K27 КФ40. Направление микронеровностей d = 1 принято регламентирующим качество поверхности БП. В работе принят допуск на отклонения от плоскостности *TFE* для нормальной относительной геометрической точности: *TFE* = 0,6 *T*. Методика измерений отклонений от прямолинейности рассмотрена в работе [11].

Режущая способность ВПК из КНБ оценивалась поправочными коэффициентами, полученными по ожидаемым аналогам медиан (3):

$$K_{de} = \left(m\hat{y}_2 / m\hat{y}_1\right)_{de}. \qquad (7)$$

Дополнительно оценена стабильность процесса шлифования при помощи коэффициентов K_{CTde}, в которых использованы *КШ*$_{de}$ (6) при варьировании $e = \overline{1;2}$, d = 1:

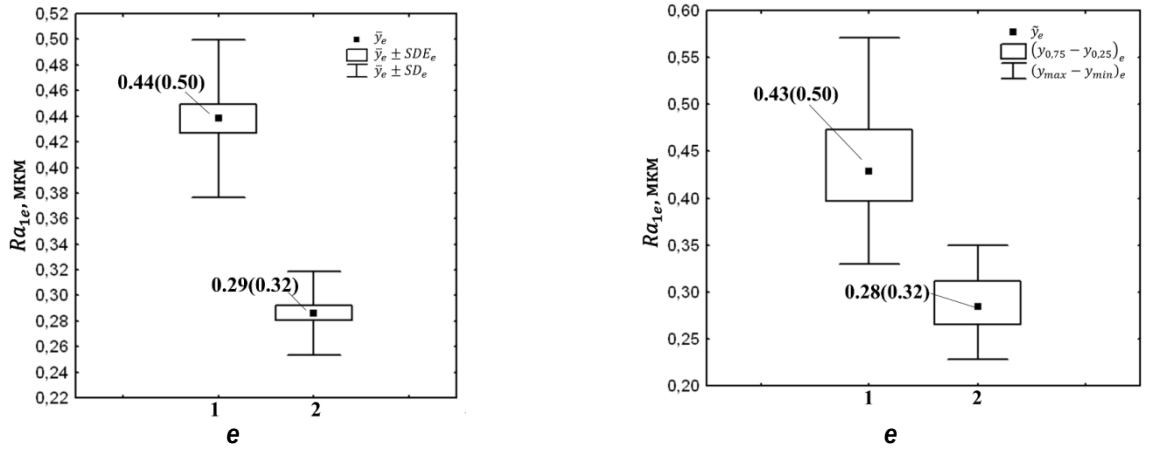
$$K_{CTde} = КШ_1 / КШ_2. \qquad (8)$$

Если (8)–(10) предсказаны меньше единицы, то прецизионность параметров *Ra*$_{de}$, *Sm*$_{de}$ и *EFEmax*$_e$ для базового варианта e = 1 оказалась выше, чем для альтернативного, а в противном случае – наоборот.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке показаны наблюдения (1) параметра Ra_1 на основе параметрической (*a*) и непараметрической (*b*) при шлифовании кругами e = 1,2. «Квадратом» обозначены меры положения: $\overline{Ra}_{1e}$ (*a*) и $\tilde{R}a_{1e}$ (*b*).

Остальные обозначения несут разную смысловую нагрузку. В случае параметрического метода (рис. *a*) «прямоугольник» – границы рассеяния стандартов ошибки ($\pm SDE_{1e}$), «усики» – рассеяние стандартов отклонений ($\pm SD_{1e}$). Для непараметрической статистики (рис. *b*), соответственно, отображены квартильные широты $\left|y_{0.75} - y_{0.25}\right|_{1e}$ и размахи $R = \left|y_{\max} - y_{\min}\right|_{1e}$. У «квадратов» дополнительно приведены категориальные величины (КВ) шероховатости согласно[4]. В таблице представлены аналоги медиан (3), а также (6), (7), (8) для сравнительной оценки



a *b*

Влияние размеров пор на одномерные распределения частот параметра R_{ae} для параметрического (a) и непараметрического (b) методов
Pore size effect on one-dimensional frequency distributions of parameter R_{ae} for parametric (a) and non-parametric (b) methods

[4]ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. Взамен ГОСТ 2789-59. Введ. Постановлением государственного комитета стандартов Совета Министров СССР № 995 от 01.01.1975. М.: Изд-во стандартов, 1973. 6 с.

Влияние размеров пор на ожидаемые меры положения параметров R_{ae}, S_{me}, EFE_{maxe} и коэффициенты (7), (8)
Pore size effect on the expected measures of position of parameters R_{ae}, S_{me}, EFE_{maxe} and coefficients (7), (8)

Параметр	ВПК из КНБ	$m\hat{y}_e$	*КШ*$_e$ (6)	*Ke* (7)	K_{CT}(8)
		мкм			
Ra_{1e}	CBN30 КФ25 (e = 1)	0,43(0,50)	0,08	1,00	1,00
	CBN30 КФ40 (*e* = 2)	0,29(0,32)	0,05	0,66	1,65
Sm_{1e}	CBN30 КФ25 (e = 1)	72,00(80)	20,79	1,00	1,00
	CBN30 КФ40 (*e* = 2)	79,00(80)	13,66	1,03	1,52
$EFEmax_e$	CBN30 КФ25 (e = 1)	13,50(7)	5,00	1,00	1,00
	CBN30 КФ40 (*e* = 2)	11,50(7)	4,00	0,85	1,25

Примечание. В скобках для параметров Ra_{1e}, Sm_{1e} указаны КВ по [12], для параметра *EFEmaxe* – степень точности по ГОСТ 24643-81[5].

влияния размеров пор ВПК на качество и стабильность процесса шлифования поверхности БП.

Совместное рассмотрение рисунка и таблицы свидетельствует о том, что наилучшие качество поверхности БП Р9М4К8 и стабильность процесса шлифования обеспечены при использовании круга e = 2 с большим размером пор. Высотная шероховатость R_{a1} по ожидаемым медианам для этого круга оказалась меньше на 2 КВ: $m\hat{R}a_{11}0,43(0,50)$ для порообразователя КФ25 и $m\hat{R}a_{12}0,29(0,32)$ для КФ40. В работе [6] было показано, что повышение проницаемости круга улучшает тепловую обстановку в зоне контакта круга с шлифуемой поверхностью. Подтверждением этому послужили результаты измерения контактной температуры при шлифовании стали Р6М5. Авторами работы было установлено, что при шлифовании крупнопористыми кругами АЭРОБОР с наполнителем А40 (соответствует порообразователю КФ40) происходит большее снижение температуры, чем при использовании кругов с порами меньших размеров (наполнитель А25), и, соответственно, с меньшей проницаемостью.

Шаговый параметр шероховатости S_{m1e} по своим опорным значениям для обоих кругов e = 1,2 оказался в пределах одной КВ. Максимальные отклонения от плоскостности также оказались в пределах одной степени точности, в то же время для ожидаемых медиан параметра EFE_2 имеет место пограничное расположение с более высокой степенью точности.

По результатам проведенного исследования установлено, что БП Р9М4К8 рекомендуется шлифовать кругом CBN30 B126 100 L V K27 КФ40 (e = 2), для которого стабильность формирования всех параметров качества оказалась выше в 1,25–1,65 раза по сравнению с ВПК с меньшей проницаемостью.

[5]ГОСТ 24643-81. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения. Взамен ГОСТ 10356-63 (в части разд. 3). Введ. Постановлением государственного комитета СССР по стандартам № 1423 от 01.07.1981. М.: Изд-во стандартов, 1981. 14 с.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обоснована необходимость шлифования сложнолегированных быстрорежущих сталей ВПК из КНБ с повышенной проницаемостью взамен традиционным абразивным кругам.

2. Показана целесообразность применения теоретико-вероятностных методов при оценке стабильности процесса шлифования и формирования качества поверхности БП. В принятых технологических условиях предпочтительным оказался непараметрический метод статистики, для которого экспериментальные данные (1) оказались наиболее приемлемыми.

3. Подтверждено влияние проницаемости ВПК из КНБ на стабильность процесса. Таким образом, порообразователь КФ25 уступает по воспроизводимости процесса порообразователю КФ40.

4. Наилучшее качество БП Р9М4К8 и высокая стабильность его формирования установлены при шлифовании кругом CBN30 B126 100 L V K27 КФ40.

Библиографический список

1. Дальский А.М. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. М.: Изд-во МАИ, 2000. 364 с.
2. Суслов А.Г., Безъязычный В.Ф., Панфилов Ю.В., Бишутин С.Г., Говоров И.В., Горленко А.О. [и др.] Инженерия поверхности / под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
3. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении / под ред. З.И. Кремня. СПб.: Политехника, 2007. 422 с.
4. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
5. Kremen' Z.I., Lebedev A.I. High-Porisity Wheels Based on Cubic Nitride for Defect-Free Grinding // Russian Engineering Research. 2011. Vol. 31. Issue. 9. P. 867–869. https://doi.org/10.3103/S1068798X11090164
6. Солер Я.И., Прокопьева А.В. Исследование влияния выхаживания на микрорельеф поверхности режущих пластин Р9М4К8 при шлифовании кругами из кубического нитрида бора // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2009. № 1. С. 24–27.
7. Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu. Selecting abrasive wheels for the plane grinding of airplane part of the basic of surface roughness // Russian Engineering Research. 2010. Vol. 30. Issue. 3. P. 251–261. https://doi.org/10.3103/S1068798X10030111
8. Солер Я.И., Шустов А.И. Прогнозирование шероховатости поверхности инструментальных сталей при плоском шлифовании нитридборовыми кругами высокой пористости // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 10. Ч. 2. С. 81–86.
9. Уиллер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами / пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. 469 с.
10. Hollander M., Wolfe D.A. Nonparametric Statistical Methods. Ed. 2. Wiley-Interscience, 1999. 787 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.amazon.com/Nonparametric-Statistical-Methods-Myles-Hollander/dp/0471190454 (24.01.2019).
11. Солер Я.И., Шустов А.И. Влияние прочности зерен на точность формы пластин Р12Ф3К10М3 при маятниковом шлифовании высокопористыми нитридборовыми кругами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 5. С. 28–33.
12. Дальский А.М., Васильев А.С., Клименко С.А., Полонский Л.Г., Хейфец М.Л. Технологические основы управления качеством машин. М.: Машиностроение, 2003. 255 с.
13. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. Изд. 5-е. М.: Металлургия, 1983. 527 с.
14. Кремень З.И., Юрьев В.Г. Шлифование суперабразивами высокопластичных сплавов. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2013. 166 с.
15. Закс Л. Статистическое оценивание / пер. с нем. М.: Статистика, 1976. 598 с.
16. Soler Ya.I., Shustov A.I. Estimation of cutting ability of cubic nitride boron wheels by surface microhardness criteria for pendulum grinding of high-speed steel plates // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2015. Vol. 91. P. 012059 [Электронный ресурс]. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/91/1/012059 (11.11.2019). https://doi.org/10.1088/1757-899X/91/1/012059
17. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю. Выбор абразивных кругов при плоском шлифовании деталей силового набора летательных аппаратов по критерию шероховатости // Вестник машиностроения. 2010. № 3. С. 55–64.
18. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
19. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / пер. с англ. М.: Мир, 1981. 520 с.
20. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.

References

1. Dal'skij AM. *Technological heredity in machinery production*. Moscow: Moscow aviation Institute; 2000, 364 p. (In Russ.)
2. Suslov AG, Bez"yazychnyj VF, Panfilov YuV, Bishutin SG, Govorov IV, Gorlenko AO, et al. In: Suslov AG (eds). *Inzheneriya poverhnosti* = Surface Engineering. Moscow: Mashinostroenie; 2008, 320 p. (In Russ.)
3. Kremen' ZI, Yur'ev VG, Baboshkin AF. In: Kremen' ZI (eds). *Tekhnologiya shlifovaniya v mashinostroenii* = Grinding technology in mechanical engineering. Saint-Petersburg: Politekhnika; 2007, 422 p. (In Russ.)
4. Starkov VK. *Grinding with high-porosity wheels*. Moscow: Mashinostroenie; 2007, 688 p. (In Russ.)
5. Kremen' ZI, Lebedev AI. High-porisity wheels based on cubic nitride for defect-free grinding. Russian Engineering Research. 2011;31(9):867–869. https://doi.org/10.3103/S1068798X11090164
6. Soler Y, Prokopeva A. The research of sparking-out effect on the roughness at the plate flat for the flat CBN-grinding of the steel brand P9M4K8. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = Metal Working and Material Science. 2009;1:24–27. (In Russ.)
7. Soler YaI, Kazimirov DYu. Selecting abrasive wheels for the plane grinding of airplane part of the basic of surface roughness. Russian Engineering Research. 2010;30(3):251–261. https://doi.org/10.3103/S1068798X10030111
8. Soler YaI, Shustov AI. The predicition of instrumental steels' roughness at grinding by high porosity nitride-boron wheels. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*= International Research Journal. 2013;10(2):81–86. (In Russ.)
9. Uiller D. Chambers D. Understanding statistical process control, 2009, 469 p. (Russ. ed.: *Statisticheskoe upravlenie processami*. Moscow, Al'pina Biznes Buks, 2009, 469 p.)
10. Hollander M, Wolfe DA. Nonparametric Statistical Methods. Ed. 2. Wiley-Interscience; 1999, 787 p. Available from: https://www.amazon.com/Nonparametric-Statistical-Methods-Myles-Hollander/dp/0471190454 [Accessed 24th January 2019].
11. Soler Y, Shustov A. Grain strength effect on P12FZK10M3 plate shape accuracy under pendular grinding with highly porous boron nitride wheels. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2015;5:28–33. (In Russ.)
12. Dal'skij AM, Vasil'ev AS, Klimenko SA, Polonskij LG, Hejfec ML. *Technological basis for machinery quality control*. Moscow: Mashinostroenie; 2003, 255 p. (In Russ.)
13. Geller YuA. *Tool steels*. Moscow: Metallurgiya; 1983, 527 p. (In Russ.)
14. Kremen' ZI, Yur'ev VG. *Superabrasive grinding of highly plastic alloys*. Saint-Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University; 2013, 166 p. (In Russ.)
15. Zaks L, Sachs L. Statistical evaluation, 1976, 598 p. (Russ. ed.: *Statisticheskoe ocenivanie*. Moscow, Statistika, 1976, 598 p.).
16. Soler YaI., Shustov AI. Estimation of cutting ability of cubic nitride boron wheels by surface microhardness criteria for pendulum grinding of high-speed steel plates. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series.* 2015;91:012059 Available from: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/91/1/012059. [Accessed 11th November 2019]. https://doi.org/10.1088/1757-899X/91/1/012059
17. Soler YaI, Kazimirov DYu. Selection of abrasive wheels for flat grinding of aircraft power set parts according to roughness criterion. *Vestnik mashinostroeniya* = Russian Engineering Research. 2010;3:55–64. (In Russ.)
18. Suslov AG. *Surface quality of machine parts*. Moscow: Mashinostroenie; 2000, 320 p. (In Russ.)
19. Dzhonson N, Lion F. *Statistics and experiment planning in engineering and science. Data processing methods,* 1981, 520 p. (Russ. ed.: *Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke. Metody obrabotki dannyh*. Moscow, Mir, 1981, 520 p.).
20. Demkin NB, Ryzhov EV. *Surface quality and machine part contact.* Moscow: Mashinostroenie; 1981, 244 p. (In Russ.)

Критерии авторства

Солер Я.И., Шустов А.И. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Authorship criteria

Soler Ya.I., Shustov A.I. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Солер Яков Иосифович,
кандидат технических наук,
профессор кафедры технологии
и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: solera@istu.irk.ru

Шустов Андрей Иванович,
кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры конструирования
и стандартизации в машиностроении,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: a.istu.edu@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yakov I. Soler,
Cand. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Mechanical Engineering
Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: solera@istu.irk.ru

Andrey I. Shustov,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Lecturer of the Department of Design
and Standardization in Mechanical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: a.istu.edu@gmail.com

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.311.001
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-85-96

Использование математической модели для настройки цифровой дифференциальной защиты трансформатора

© М.В. Андреев, А.А. Суворов, А.В. Киевец, В.Е. Рудник
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Резюме: Цель – защита электроэнергетической системы, являющаяся одной из наиболее сложных и актуальных задач, поскольку от правильности функционирования релейной защиты и автоматики во многом зависит устойчивость работы электроэнергетической системы в целом. Главная трудность заключается в определении настроек, обеспечивающих корректное функционирование релейной защиты в энергосистемах. Причиной этого является отсутствие методов и средств, позволяющих адекватно учесть динамику изменения режима электроэнергетической системы во время аварии. Сказанное подтверждается применением для расчета токов коротких замыканий, используемых при формировании настроек релейной защиты, максимально упрощенных моделей оборудования электроэнергетической системы и соответствующих математических методов, позволяющих весьма грубо оценить действующее значение токов коротких замыканий в момент времени t = 0 с только для одной фазы. Для расчета токов остальных фаз применяется метод симметричных составляющих. Существенное несоответствие в некоторых случаях таких настроек фактическим условиям функционирования защиты подтверждается статистикой аварийности в электроэнергетической системе, а также статистическими данными неправильных действий релейной защиты. Авторами предложен новый подход настройки релейной защиты. Его особенностью является использование детализированных математических моделей, описывающих процессы одновременно во всей совокупности элементов в схеме релейной защиты, включая первичные преобразователи, в комбинации с гибридным симулятором энергосистем всережимного моделирующего комплекса реального времени электрооборудования электроэнергетических систем, реализующего методически точное аналого-цифровое решение математических моделей оборудования электроэнергетической системы. Используя данный подход, выполнена настройка цифровой дифференциальной защиты трансформатора с применением стандартной четырехзонной характеристики срабатывания. Также авторами предложен новый подход по формированию гибкой многозонной характеристики срабатывания, огибающей аварийные характеристики $I_д = f(I_т)$ тех режимов, в которых цифровая дифференциальная защита трансформатора не должна срабатывать. Внедрение данной методики позволит определить настройки релейной защиты в конкретных условиях ее функционирования, отказаться от излишнего загрубления уставок, что в совокупности обеспечит надежное всережимное функционирование защиты.

Ключевые слова: математическое моделирование, гибридное моделирование, настройка, релейная защита, всережимный моделирующий комплекс, электрооборудование электроэнергетических систем

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2019-1052.

Информация о статье: Дата поступления 10 октября 2019 г.; дата принятия к печати 19 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Андреев М.В., Суворов А.А., Киевец А.В., Рудник В.Е. Использование математической модели для настройки цифровой дифференциальной защиты трансформатора. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 1. С. 85–96. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-85-96

Digital transformer differential protection setting using its mathematical models

Mikhail V. Andreev, Aleksey A. Suvorov, Anton V. Kievets, Vladimir E. Rudnik
National research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract: The purpose of protecting the electric power system is one of the most complicated and urgent tasks since the stability of the whole electric power system largely depends on the correct operation of relay protection and automation. The main difficulty lies in determining the settings that ensure the correct operation of relay protection in power systems. The reason for this is the lack of methods and means providing the opportunity for adequate consideration of the varia-

tion dynamics of the electric power system mode during the accident. This is confirmed by the application of the most simplified models of electric power system equipment and corresponding mathematical methods for calculating short-circuit currents used in the formation of relay protection settings, which allow a very rough estimate of the effective value of short-circuit currents at the time period $t = 0$ s for only one phase. To calculate the currents of remaining phases, the method of symmetric components is used. In some cases, significant discrepancy of such settings to the actual conditions of protection operation is proved by the statistics of electric power system accidents, as well as by the statistical data of incorrect relay protection actions. The authors propose a new approach to relay protection setting. Its feature is the use of detailed mathematical models describing the processes simultaneously in the totality of all elements in the relay protection circuit (including primary converters) in combination with a hybrid simulator of power systems of an all-time simulation complex of electric power system electrical equipment real-time, which implements a methodically accurate analog-digital solution of mathematical models of electric power system equipment. Using this approach, the digital differential protection of a transformer is configured using a standard four-zone tripping characteristic. Also, the authors propose a new approach to the formation of a flexible multi-zone tripping characteristic that envelopes the emergency characteristics of $I_Д = f(I_Т)$ of those modes in which the digital differential protection of the transformer should not be triggered. The introduction of this procedure will allow to determine relay protection settings in specific conditions of its operation as well as to avoid excessive roughening of settings, which will ensure reliable all-time operation of protection.

Keywords: mathematical modeling, hybrid modeling, tuning, relay protection, all-mode modeling complex, electrical equipment of electric power systems

Acknowledgements: The performed work is supported by the Ministry of science and higher education of the Russian Federation, Agreement No. 075-15-2019-1052.

Information about the article: Received October 10, 2019; accepted for publication December 19, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Andreev MV, Suvorov AA, Kievets AV, Rudnik VE. Digital transformer differential protection setting using its mathematical models. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):85–96. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-85-96

1. ВВЕДЕНИЕ

В электрооборудовании электроэнергетических систем (ЭЭС) неизбежно возникают различного рода повреждения, среди которых наиболее опасным является короткое замыкание (КЗ). Задача обнаружения и локализации КЗ возлагается на релейную защиту (РЗ), правильность функционирования которой в значительной степени определяется ее настройкой.

Проанализировав конкретные причины неправильных действий РЗ [1–4], можно утверждать, что сохраняется проблема определения уставок защиты, гарантирующих с высокой вероятностью ее корректное функционирование в конкретных рабочих условиях. Это обусловлено значительным количеством влияющих на конечное решение факторов. К ним прежде всего относятся: вид повреждения, место повреждения, наличие электрической дуги или переходного сопротивления в месте повреждения, возможность перехода одного вида повреждения в другой, конфигурация ЭЭС и ее эквивалентные параметры относительно места повреждения и установки РЗ, которые могут изменяться во времени как в зависимости от режимов работы ЭЭС, так и непосредственно во время аварии вследствие отключения (включения) отдельных выключателей и др.

2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Учет большей части перечисленных выше факторов возможен только при формировании настроек РЗ в процессе детального математического моделирования как ЭЭС, так и самих РЗ, включая первичные измерительные преобразователи: трансформаторы тока (ТТ) и напряжения.

О возможности и перспективности применения математических моделей для настройки РЗ упоминается во множестве работ, в частности [5–14]. Объектом исследования всех проектов является современная цифровая релейная защита (ЦРЗ), в рамках данной статьи – цифровая дифференциальная защита трансформатора (ЦДЗТ). В результате литературного обзора выделены следующие недостатки.

1. Слабо проработаны математические модели промежуточных преобразова-

телей [5–10, 13, 14] в составе ЦРЗ. Элементы моделируются в виде коэффициентов трансформации.

2. При моделировании РЗ полностью исключены модели промежуточных преобразователей и фильтров [10, 11] измерительной части ЦРЗ. Влияние различных промежуточных преобразователей и фильтров ЦРЗ исследовано авторами в [15].

3. Первичные преобразователи, промежуточные преобразователи и фильтры моделируются независимо друг от друга [5–14]. При этом для ТТ, например, вследствие этого исключается влияние на его работу нелинейной частотно-зависимой нагрузки.

4. Упрощенно (без учета гистерезиса) моделируется [5–10, 13, 14] характеристика намагничивания ТТ.

5. При моделировании ТТ нагрузка, в которую входят другие элементы измерительной части (ИЧ) (частотные фильтры, промежуточные трансформаторы), воспроизводится упрощенно в виде сопротивления, величина которого задана в пределах допустимого значения и имеет явно выраженный тип, как правило, резистивный [5–14]. При этом доказано теоретически и экспериментально [16], что величина и характер нагрузки (резистивный, резистивно-индуктивный, резистивно-емкостный или резистивно-индуктивно-емкостный) в значительной степени определяет вторичный сигнал и погрешности ТТ.

Учитывая вышесказанное, на сегодняшний день разработка более совершенных методов и средств настройки РЗ, учитывающих современные особенности развития ЭЭС, является актуальной.

3. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Авторами реализуется проект, направленный на разработку методики настройки РЗ современных ЭЭС, основой которой является совместное использование Всережимного моделирующего комплекса реального времени электрооборудования электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) и детальных математических моделей РЗ, воспроизводящих как единое целое все ключевые и известные элементы защиты. Целью представленных исследований являлись разработка и исследования подобных методов настройки применительно к ЦДЗТ.

4. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Авторами сформулирован и обоснован подход к разработке детальных математических моделей РЗ, называемых «всережимными». Положения этого подхода представлены, например в [17]. Радикальным его отличием от существующих является моделирование одновременно всей совокупности элементов, входящих в состав конкретной РЗ, включая первичные преобразователи, а не отдельные элементы измерительных трансформаторов, частотных фильтров, реле и т.д. Другой важной особенностью является применение Всережимного моделирующего комплекса реального времени электрооборудования электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) [18] в качестве источника первичной информации о процессах в ЭЭС. Следует отметить, что математическая модель защиты реализована в специализированном гибридном процессоре моделирования цифровой релейной защиты (СГП ЦРЗ) [19], который совместно с ВМК РВ ЭЭС использовался в работе для выполнения экспериментов.

Что касается настройки РЗ, то обобщенно предлагаемый подход описывается схемой на рис. 1.

Настройки РЗ определяются в процессе моделирования режимов в совокупной модели «ЭЭС-РЗ». После того как выполнена проверка во всех режимах, и некорректного поведения защиты не выявлено, формируются уставки для реального устройства защиты. Данный подход представляется долгим и трудозатратным, однако позволяет более адекватно настроить РЗ. Это достигается благодаря учету влияния всего оборудования ЭЭС, а также про-

межуточных преобразователей и фильтров в измерительной части РЗ. Данный алгоритм можно автоматизировать, что будет являться последующей работой авторов. В таком случае экономия времени станет существенной. Предлагаемый подход является гибким с точки зрения адаптации к изменениям в ЭЭС. Добавляя новые модели, например, возобновляемых источников энергии, FACTS и HVDC систем и др. в модель ЭЭС, можно анализировать их влияние на функционирование конкретной РЗ и учитывать его в ее настройках естественным образом.

Алгоритм ЦДЗТ определяет факт наличия или отсутствия внутреннего КЗ в соответствии с характеристикой срабатывания (ХС) на рис. 2 *a* (доп. торм. – зона дополнительного торможения) в зависимости от текущих значений дифференциального ($I_{diff} = I_д$) и тормозного токов ($Ir_{est} = I_т$). Суть настройки дифференциальной защиты заключается в определении координат точек для построения ХС, разделяющей плоскость на области срабатывания и несрабатывания. При этом используются следующие параметры: $I_{diff>}$ – минимальный ток срабатывания, $I_{diff>>}$ – ток срабатывания дифференциальной отсечки, I_{base1} – положение точки пересечения характеристики торможения с осью X, slope1 – наклон первой ветви характеристики срабатывания, I_{base2} – ток начала торможения характеристики, slope2 – минимальная уставка наклона второго участка характеристики торможения, I_{add} – ток дополнительного торможения.

При использовании стандартной четырехзонной ХС возможно существенное снижение чувствительности защиты на начальном этапе (работа без торможения) при отстройке от некоторых режимов, в которых высок риск неправильного действия ЦДЗТ. При таком методе настройки не всегда получается обеспечить максимальную чувствительность ЦДЗТ, исключив при этом все неправильные действия. Поэтому ниже предложен альтернативный подход формирования ХС ЦДЗТ, базирующийся исключительно на результатах моделирования «ЭЭС-РЗ». Данный подход исключает необходимость предварительного расчета уставок. Суть его отражает рис. 2 *b*: внутр. КЗ – аварийные характеристики при внутренних КЗ; режимы несраб. – режимы, в которых ЦДЗТ не должна срабатывать; совокуп. несраб. – совокупная аварийная характеристика.

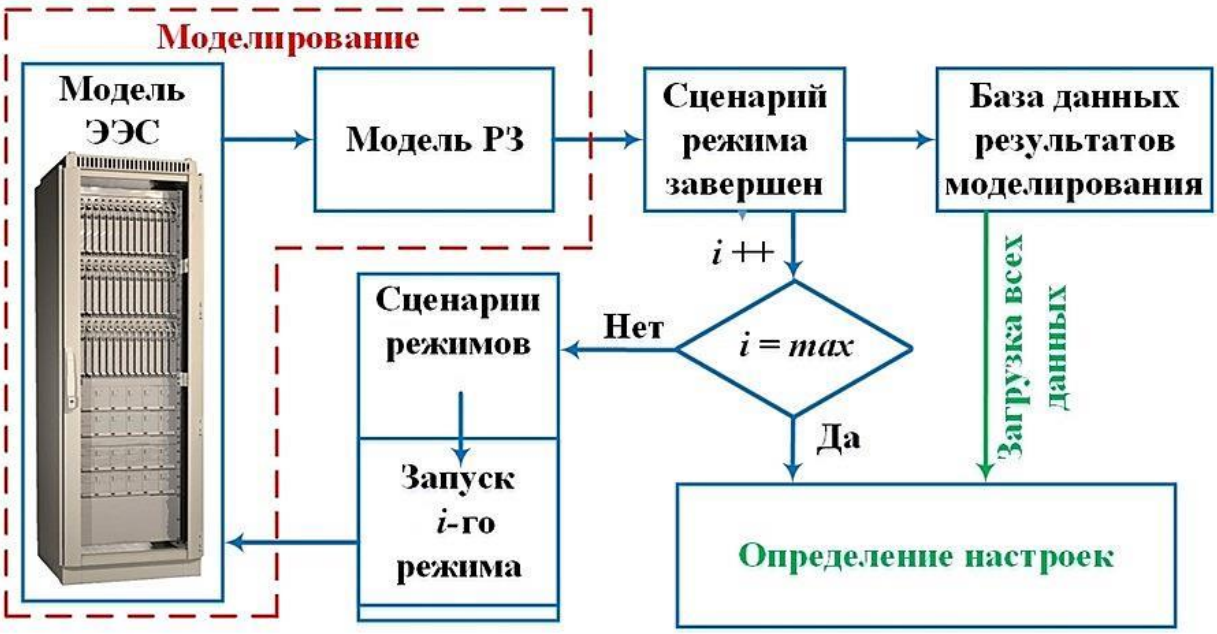
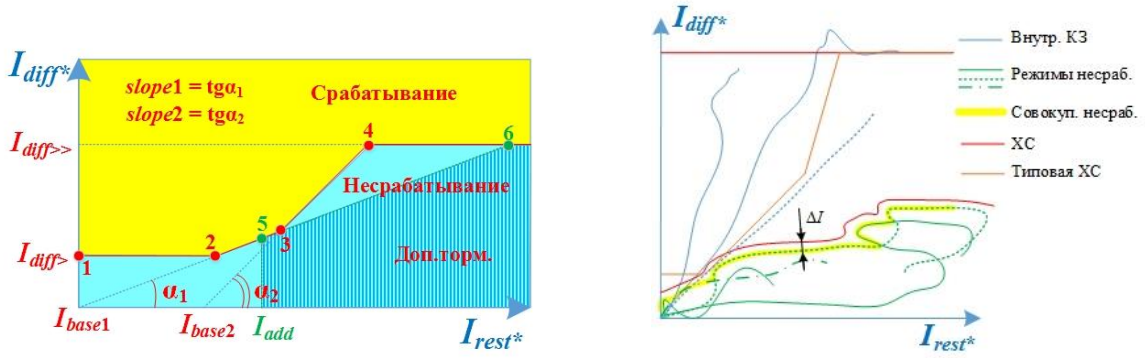


Рис. 1. Обобщенная структура предлагаемого подхода
Fig. 1. Generalized structure of the proposed approach



a *b*

Рис. 2. Формирование характеристики срабатывания цифровой дифференциальной защиты трансформатора: a – стандартная четырехзонная характеристика срабатывания; b – формирование характеристики срабатывания на основании результатов моделирования (ΔI – запас)

Fig. 2. Formation of NTDP tripping characteristic: a – standard four-zone tripping characteristic; b – tripping characteristic formation based on simulation results (ΔI – reserve)

Новая ХС отстает от ближайшей аварийной характеристики на ΔI. Основная сложность данного подхода заключается в необходимости продумать на начальном этапе перечень режимов для моделирования. Поначалу он может быть весьма широким, однако в результате исследований функционирования РЗ некоторые режимы объективно могут быть отброшены. В статье не показано, но следует отметить, что в процессе исследований была выявлена возможность исключения режимов перехода одного вида КЗ в другой. Предлагаемый подход требует использовать детальные математические модели ЭЭС и РЗ.

Возникает вопрос о том, что должна учитывать математическая модель РЗ, чтобы называться адекватной. На этот вопрос применительно к ЦДЗТ авторы ответили, основываясь на исследованиях [15, 17].

Далее представлены фрагменты исследований функционирования ЦДЗТ. В качестве защищаемого выбран силовой трансформатор 80000 кВ·А,110/35/10.5 кВ.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первоначально исследовалась работа модели ЦДЗТ, настроенной по стандартной методике [20]. Результаты некоторых режимов представлены на рис. 3–5.

При трехфазном внешнем КЗ на стороне СН произошло попадание аварийной характеристики в зону срабатывания и как следствие – ложное действие ЦДЗТ. Для пояснения причин неправильного действия ЦДЗТ приведем осциллограмму токов фазы А на выходе измерительных частей, подключенных к сторонам ВН, СН и НН силового трансформатора (рис. 3 *а*: Ia_ВН, Ia_СН, Ia_НН – токи фазы *А* соответственно стороны высшего напряжения (ВН), среднего (СН) и низшего (НН) напряжения защищаемого силового трансформатора).

Основная причина ложного действия при трехфазном КЗ связана со значительным смещением по фазе токов ВН и НН относительно друг друга из-за влияния работы синхронного двигателя, который перешел в асинхронный режим после КЗ. В итоге токи ВН и НН не суммируются, а в некоторый момент времени почти полностью компенсируют друг друга. При этом компенсация тока СН мала. Все это, в конечном счете, дает увеличение дифференциального тока. Для сравнения, при однофазном КЗ смещение между токами на выходах измерительных частей со сторон ВН и НН незначительно, и они в сумме компенсировали ток СН. При двухфазном КЗ

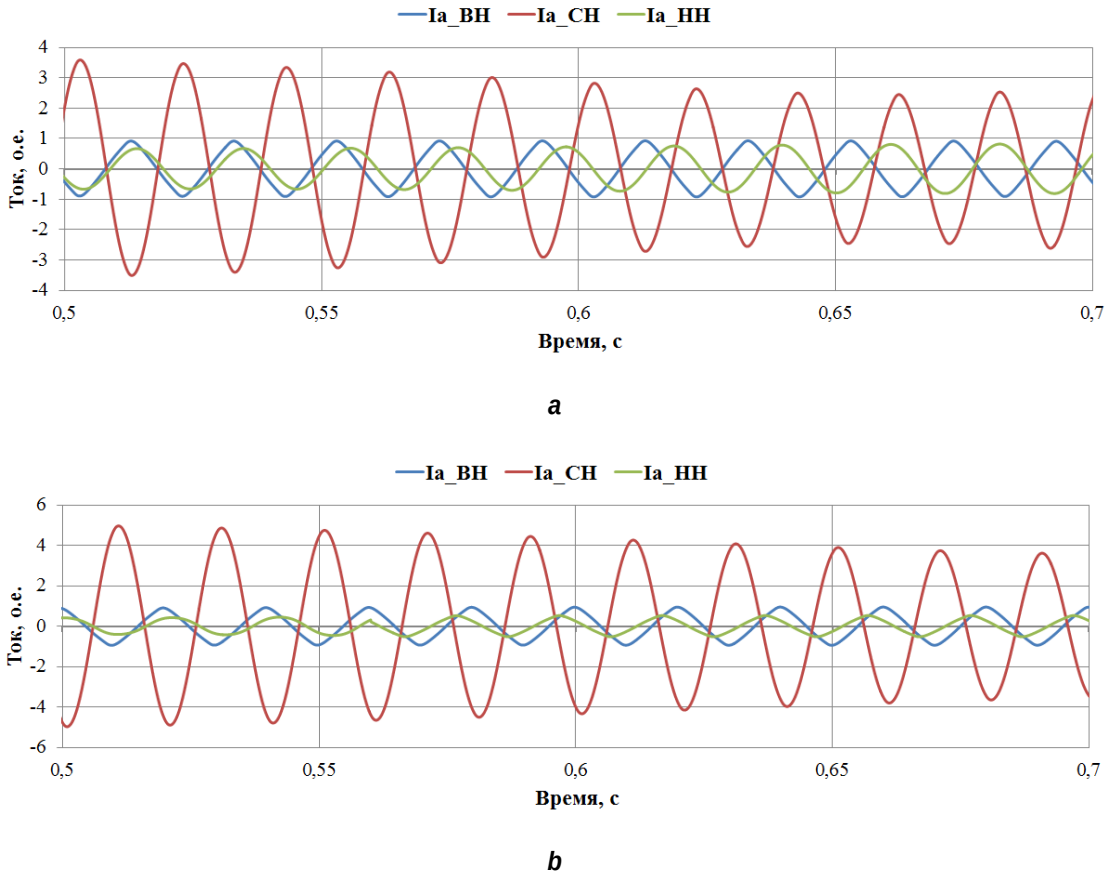


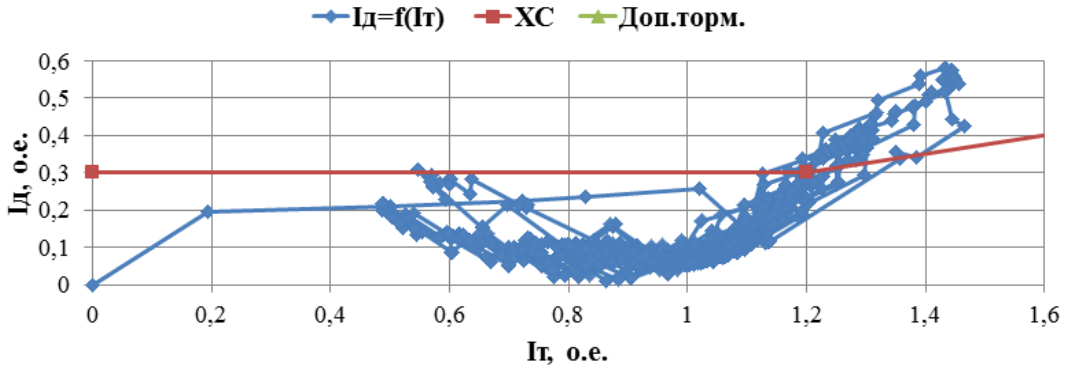
Рис. 3. Токи фазы А (Ia) на выходе измерительных частей, подключенных к сторонам ВН, СН и НН силового трансформатора при КЗ: a – ABCG на шинах 35 кВ; b – ABG на шинах 35 кВ
Fig. 3. Phase A currents (Ia) at the output of the measuring parts connected to HV, MV and LV sides of the power transformer under short circuits: a – ABCG on 35kV buses; b – ABG on 35kV buses

это смещение также невелико. Для подтверждения приведем осциллограмму токов фазы А на выходе измерительных частей, подключенных к сторонам ВН, СН и НН силового трансформатора при двухфазном КЗ (рис. 3 *b*). Причина того, что при двухфазном КЗ смещения токов ВН и НН нет, а при трехфазном оно есть, связана с различной фазовой погрешностью ТТ и измерительной части ЦДЗТ в целом, ввиду того, что трехфазное КЗ более тяжелое. Кроме того, момент установки КЗ не контролировался, вследствие чего момент начала и динамика затухания переходного процесса сильно различались. В данном случае некоторый эффект неопределенности добавляет реалистичности моделируемым режимам КЗ. Представленный опыт наглядно показал, что от того, как будет развиваться режим ЭЭС во время аварии, определяет поведение защиты.

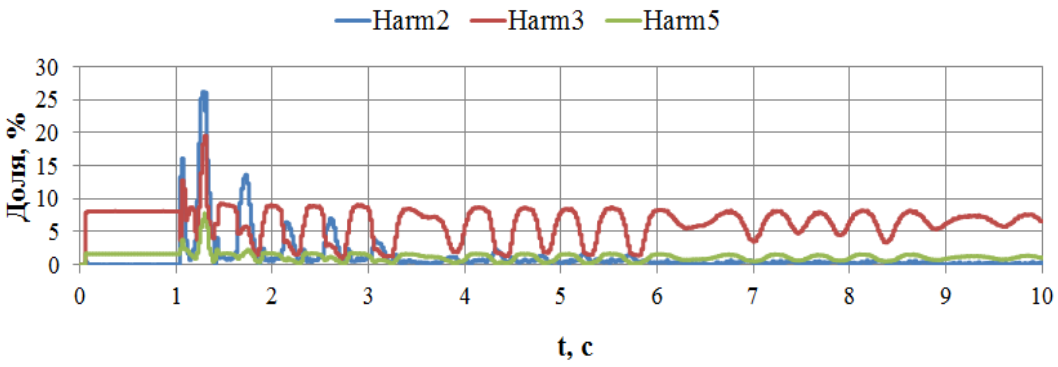
Несинхронное включение генераторов (рис. 4 *a*: доп. торм – зона дополнительного торможения; $I_Д$ – дифференциальный ток; $I_Т$ – тормозной ток) ближайшей электростанции приводит к незначительному броску тока намагничивания (БНТ). Данный процесс, однако, сопровождается продолжительными качаниями в энергосистеме, что сказывается на динамике изменения аварийных характеристик – периодические переходы из зоны несрабатывания в зону срабатывания и наоборот. В каждой зоне характеристики находится по 4–5 периодов (80–100 м/с), что более чем достаточно для срабатывания защиты. Рис. 4 *b* отображает изменения гармонических составляющих во времени: по оси Y откладывается доля исследуемой гармоники по отношению к первой (50 Гц), иначе говоря: «доля, %» равна отношению текущего значения исследуемой гармоники к значению

первой гармоники. В соответствии с этими диаграммами наблюдается кратковременное превышение уставки в 15% по 2-й гармонике (Harm2). На протяжении основной части режима 3-я гармоника (Harm3) имеет большую долю, чем 2-я и 5-я (Harm5), но недостаточную (меньше 15 и 20%, соответственно), чтобы блокировать действие комплектов ЦДЗТ. «Качания» сигналов связаны с качаниями синхронного генератора на электростанции, которые к концу записанного процесса (10 с) начинают затухать, т.е. генератор втягивается в синхронную работу. Этот режим не является аварийным, а, соответственно, генератор не должен выводиться из работы. Тем не менее подобный режим спровоцировал ложное действие защиты трансформатора близко расположенной подстанции. Соответственно, его необходимо учесть при формировании итоговой ХС, поскольку выявлены неправильные незаблокированные действия защиты.

Для отстройки от ложных срабатываний сведем все траектории $I_Д = f(I_Т)$, соответствующие режимам, в которых это имело место быть, в одни координаты и сформируем новые характеристики срабатывания для комплектов каждой фазы. Для сравнения на рисунках представлены два варианта формирования ХС: 1) стандартная четырехзонная ХС (рис. 5 *a*), проходящая над аварийными характеристиками, в которой возможно неправильное действие защиты; 2) многозонная ХС по предлагаемому методу (рис. 5 *b*). На этих же осях отражена ХС, построенная в соответствии с начальными настройками по стандартной методике.



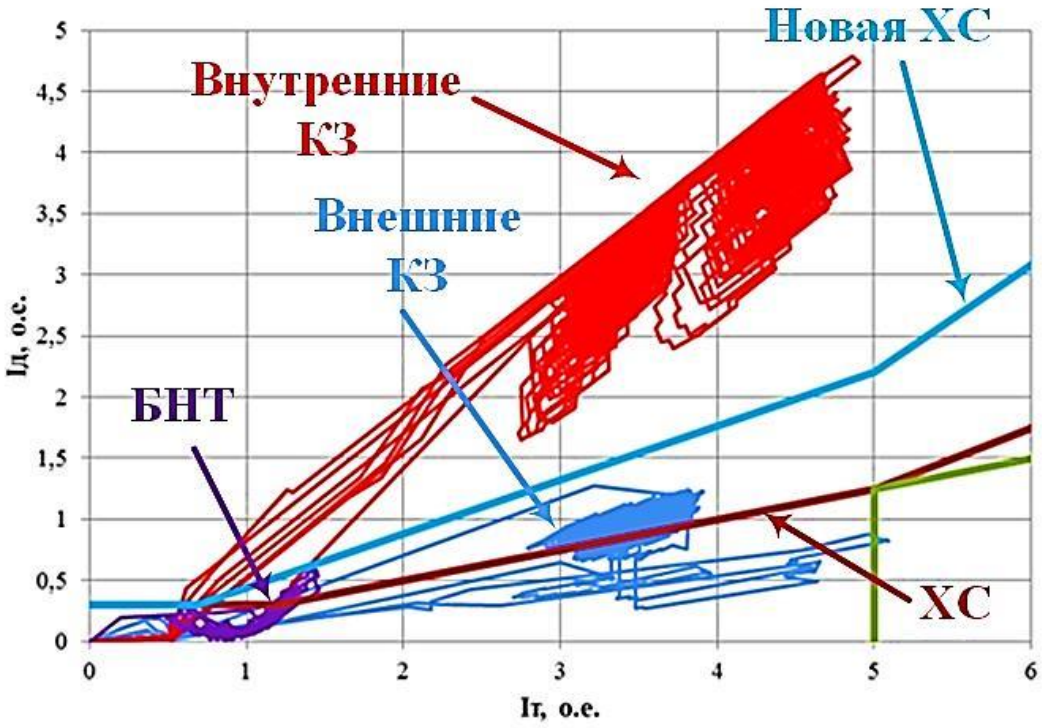
a



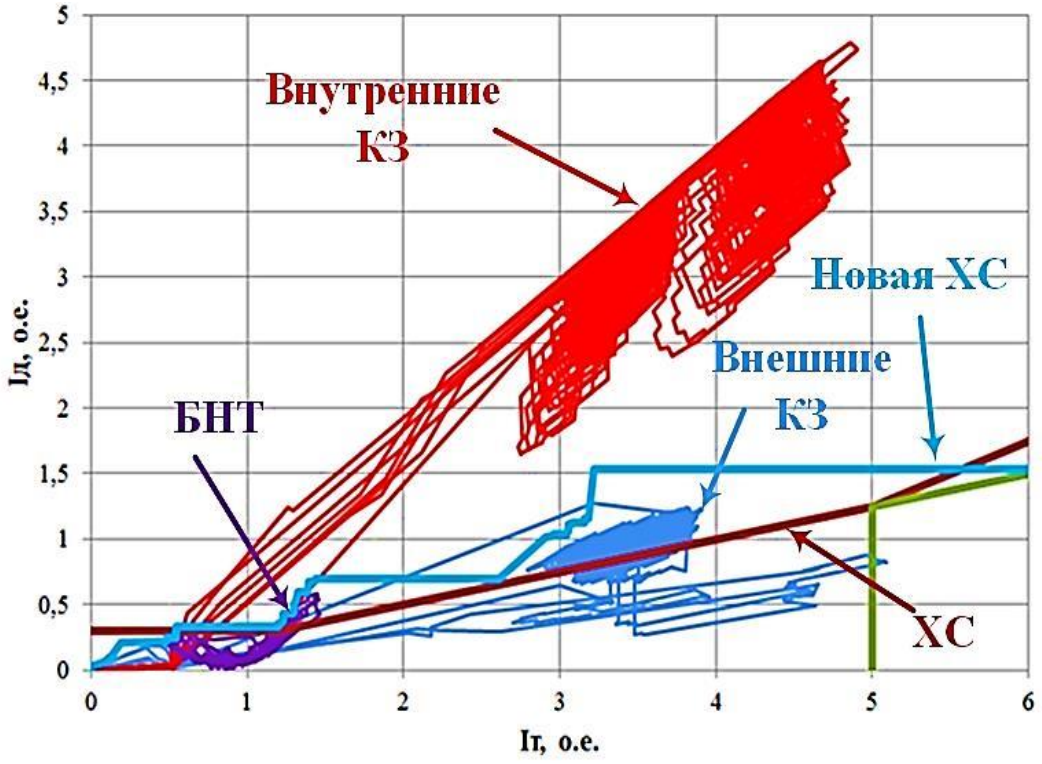
b

Рис. 4. Аварийная характеристика и характеристика срабатывания комплекта фазы А при несинхронном включении генераторов на электростанции (a); гармонический состав фазного тока стороны ВН (b)

Fig. 4. Fault curve and tripping characteristic of the phase A set under asynchronous connection of power plant generators (a); harmonic component of HV phase current (b)



a



b

Рис. 5. Формирование четырехзонной характеристики срабатывания по результатам моделирования (a); формирование многозонной характеристики срабатывания по результатам моделирования (b)
Fig. 5. Four-zone tripping characteristic formation based on simulation results(a); multi-zone tripping characteristic formation based on simulation results (b)

Выводы по всем исследованным режимам.

1. При внешних КЗ аварийные характеристики поврежденных фаз смещались вдоль оси абсцисс во второй сектор под ХС (зона несрабатывания). Исключение составляют все режимы с трехфазными КЗ, в которых характеристики сразу смещались в зону срабатывания при возникновении данного вида повреждения. Во всех опытах, включавших трехфазное КЗ, наблюдалось неправильное действие комплектов ЦДЗТ. Это наглядно продемонстрировал тот факт, что предшествующий аварии режим ЭЭС и дальнейшая реакция энергосистемы определяют погрешности элементов РЗ и поведение защиты в целом. Это подкрепляет вывод о необходимости настройки РЗ (или верификации настроек) на основании детального динамического (с использованием системы дифференциальных уравнений) моделирования совокупности «ЭЭС-РЗ». В противном случае такие режимы могли быть выявлены только при эксплуатации.

2. Ни в одном режиме внутреннего КЗ неправильных действий комплектов ЦДЗТ не наблюдалось.

3. Во всех режимах БНТ наблюдалось разное по длительности пребывания попадание аварийных характеристик в зону срабатывания для комплектов ЦДЗТ. При этом доля 2-й гармонической составляющей превышала уставку 15%, что должно блокировать работу ЦДЗТ. Исключением был режим несинхронного включения генераторов на ближайшей электростанции: сначала один генератор, через 0,1 с – второй генератор. Данный режим характеризовался продолжительными качаниями в энергосистеме. При этом наблюдались периодические переходы из зоны несрабатывания в зону срабатывания и наоборот. Гармоническое торможение в данном режиме не блокировало действие комплектов ЦДЗТ, что являлось некорректным.

4. При исследовании ЦДЗТ в режиме перевозбуждения трансформатора наблюдались попадания аварийной характеристики в зону срабатывания. При этом, однако, четко срабатывала гармоническая блокировка.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена новая методика настройки ЦДЗТ, адаптируемая под развитие современных энергосистем. Внедрение данной методики позволит определять настройки релейной защиты в конкретных условиях ее функционирования, отказаться от излишнего загрубления уставок, что в совокупности обеспечит надежное всережимное функционирование защиты.

В перспективе процесс настройки РЗ с использованием разработанной методики планируется автоматизировать, разработав соответствующее программное обеспечение, которое будет работать автономно либо в сочетании с ВМК РВ ЭЭС. Также планируется разработка системы удаленной настройки РЗ в реальном времени без вывода ее из эксплуатации.

Библиографический список

1. Sykes J., Madani V., Burger J., Adamiak M., Premerlani W. Reliabilty of Protection Systems (What Are the real Concerns) // Proceeding Protective Relay Engineer Conference (College Station, 29 March – 1 April 2010). College Station: IEEE, 2010. P. 1–16. https://doi.org/10.1109/CPRE.2010.5469482

2. Kjolle G.H., Heggset J., Hjartsjo B.T., Engen H. Protection system faults 1999–2003 and the influence on the reliability of supply // Conference Power Tech (St. Petersburg, 27–30 June 2005). St. Petersburg: IEEE, 2005. P. 1–6. https://doi.org/10.1109/PTC.2005.4524408

3. Соловьев А.Л. Релейная защита и повышение надежности электроснабжения // Энергетик. 2009. № 10. С. 22.

4. Atputharajah A., Kumar Saha T. Power System Blackouts – Literature review // International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS) (Sri Lanka, 28–31 December 2009). Sri Lanka: IEEE, 2009. P. 460–465. https://doi.org/10.1109/ICIINFS.2009.5429818

5. Rongxiang Y., Hailiang Z. Research and Development of Visual Relaying Protection Setting Simulation System // 2006 International Conference on Power System Technology (Chongqing, 22–26 October 2006). Chongqing: IEEE, 2006. P. 1–4.

http://dx.doi.org/10.1109/ICPST.2006.321943
6. Motter D., Vieira J.C.M., Coury D.V. Development of frequency-based anti-islanding protection models for synchronous distributed generators suitable for real time simulations // IET Generation, Transmission & Distribution. 2015. Vol. 9. No. 8. P. 708–718. http://dx.doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0390
7. Meliopoulos A.P.S., Cokkinides G.J., Myrda P., Yu Liu, Rui Fan, Liangyi Sun, et al. Dynamic State Estimation-Based Protection: Status and Promise // IEEE Transactions on Power Delivery. 2016. Vol. 32. Issue 1. P. 320–330. http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2613411
8. Qiteng Hong, Booth C., Dyśko A., Catterson V. Design of an intelligent system for comprehensive validation of protection settings // 13th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP) (Edinburgh, 7–10 March 2016). Stevenage: Institution of Engineering and Technology, 2016. P. 1–6. http://dx.doi.org/10.1049/cp.2016.0080
9. Rodriguez D.F.C., Osorio J.D.P., Ramos G. Virtual Relay Design for Feeder Protection Testing With Online Simulation // Conference Industry Applications Society Annual Meeting (Portland, 2–6 October). Portland: IEEE, 2016. P. 1–7. https://doi.org/10.1109/IAS.2016.7731981
10. Mahadevan N., Dubey A., Chhokra A., Guo H., Karsai G. Using Temporal Causal Models to isolate Failures in Power System Protection Devices // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2015. Vol. 18. No. 4. P. 28–39. https://doi.org/10.1109/MIM.2015.7155770
11. Shih-Chieh Hsieh, Chao-Shun Chen, Cheng-Ta Tsai, Cheng-Ting Hsu, Chia-Hung Lin. Adaptive Relay Setting for Distribution Systems Considering Operation Scenarios of Wind Generators // IEEE Transactions on Industry Applications. 2014. Vol. 50. Issue 2. P. 1356–1363. https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2274613
12. Румянцев Ю.В. Комплексная модель для исследования функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59. № 3. С. 203–224. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-3-203–224
13. Ершов Ю.А., Киселев Д.Н. Исследование цифровых дифференциальных защит трансформаторов // Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2016. № 34-1. С. 176–185.
14. Ершов Ю.А., Малеев А.В. Моделирование микропроцессорных релейных защит в среде MATLAB // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2010. Т. 3. № 2. С. 220–228.
15. Andreev M.V., Gusev A., Suvorov A., Ruban N., Ufa R. Study of mutual influence of measuring part elements of transformer differential protection and its impact on the primary signal processing // Przeglad Elektrotechniczny. 2018. Vol. 94. No. 9. P. 71–74. https://doi.org/10.21122/10.15199/48.2018.09.18
16. Erenturk K. ANFIS-Based Compensation Algorithm for Current-Transformer Saturation Effects // IEEE Transactions on Power Delivery. 2009. Vol. 24. No. 1. P. 195–201. 2009. https://doi.org/10.1109/tpwrd.2008.2005882
17. Андреев М.В., Рубан Н.Ю., Суворов А.А., Уфа Р.А. Исследование измерительной части цифровых устройств релейной защиты // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2017. № 5. С. 92–98. http://dx.doi.org/10.17213/0136-3360-2017-5-92-98
18. Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Суворов А.А., Рубан Н.Ю., Уфа Р.А. Концепция и базовая структура всережимного моделирующего комплекса // Газовая промышленность. Автоматизация. 2017. № 5. С. 18–27.
19. Андреев М.В., Суворов А.А., Аскаров А.Б., Киевец А.В. Проблема численного моделирования цифровой релейной защиты и ее аналого-цифровое (гибридное) решение // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. № 6. 2018. С. 77–83. http://dx.doi.org/10.17213/0136-3360-2018-6-77-83
20. Manual for Differential Protection 7UT6x V4.6, Siemens, 2014 // Manuals [Электронный ресурс]. URL: https://www.manualslib.com/manual/1406580/ Siemens-Siprotec-4-7ut6-Series.html?page=92 (23.02.2018).

References

1. Sykes J, Madani V, Burger J, Adamiak M, Premerlani W. Reliabilty of Protection Systems (What Are the real Concerns). In: Proceeding Protective Relay Engineer Conference. 29 March – 1 April 2010, College Station. College Station: IEEE; 2010, p. 1–16. https://doi.org/10.1109/CPRE.2010.5469482
2. Kjolle GH, Heggset J, Hjartsjo BT, Engen H. Protection system faults 1999–2003 and the influence on the reliability of supply. In: Conference Power Tech. 27–30 June 2005, St. Petersburg. St. Petersburg: IEEE; 2005, p. 1–6. https://doi.org/10.1109/PTC.2005.4524408
3. Soloviev AL. Relay protection and improvement of power supply reliability. *Energetik* = Power and Electrical Engineering. 2009;10:22. (In Russ.)
4. Atputharajah A, Kumar Saha T. Power System Blackouts – Literature review. In: International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS). 28–31 December 2009, Sri Lanka. Sri Lanka: IEEE; 2009, p. 460–465. https://doi.org/10.1109/ICIINFS.2009.5429818
5. Rongxiang Y, Hailiang Z. Research and Development of Visual Relaying Protection Setting Simulation System. In: International Conference on Power System Technology. 22–26 October 2006, Chongqing. Chongqing: IEEE; 2006, p. 1–4. 10.1109/ICPST.2006.321943
6. Motter D, Vieira JCM, Coury DV. Development of frequency-based anti-islanding protection models for synchronous distributed generators suitable for real-

time simulations. IET Generation, Transmission & Distribution. 2015;9(8):708–718. http://dx.doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0390
7. Meliopoulos APS, Cokkinides GJ, Myrda P, Yu Liu, Rui Fan, Liangyi Sun, et al. Dynamic State Estimation-Based Protection: Status and Promise. IEEE Transactions on Power Delivery. 2016;32(1):320–330. http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2613411
8. Qiteng Hong, Booth C, Dyśko A, Catterson V. Design of an intelligent system for comprehensive validation of protection settings. In: 13th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP). 7–10 March 2016. Edinburgh: Stevenage Institution of Engineering and Technology; 2016, p. 1–6. http://dx.doi.org/10.1049/cp.2016.0080
9. Rodriguez DFC, Osorio JDP, Ramos G. Virtual Relay Design for Feeder Protection Testing With Online Simulation. In: Conference Industry Applications Society Annual Meeting. 2–6 October, Portland. Portland: IEEE, 2016. P. 1–7. https://doi.org/10.1109/IAS.2016.7731981
10. Mahadevan N, Dubey A, Chhokra A, Guo H, Karsai G. Using Temporal Causal Models to isolate Failures in Power System Protection Devices. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2015;18(4):28–39. https://doi.org/10.1109/MIM.2015.7155770
11. Shih-Chieh Hsieh, Chao-Shun Chen, Cheng-Ta Tsai, Cheng-Ting Hsu, Chia-Hung Lin. Adaptive Relay Setting for Distribution Systems Considering Operation Scenarios of Wind Generators. IEEE Transactions on Industry Applications. 2014;50(2):1356–1363. https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2274613
12. Rumiantsev YuV. A Comprehensive Model for the Power Transformer Digital Differential Protection Functioning Research. Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. 2016;59(3):203–224. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-3-203–224. (In Russ.)
13. Ershov YuA, Kiselev DN. Research of digital differential protection of transformers. *Prioritetnye nauchnye napravleniya: ot teorii k praktike* = Priority research prospects: from theory to practice. 2016;34-1:176–185. (In Russ.)
14. Ershov YuA, Maleev AV. Microprocessor Relay Protection Modeling in MATLAB. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2010;3(2):220–228. (In Russ.)
15. Andreev MV, Gusev A, Suvorov A, Ruban N, Ufa R. Study of mutual influence of measuring part elements of transformer differential protection and its impact on the primary signal processing. Przeglad Elektrotechniczny. 2018;94(9):71–74. https://doi.org/10.21122/10.15199/48.2018.09.18
16. Erenturk K. ANFIS-Based Compensation Algorithm for Current-Transformer Saturation Effects. IEEE Transactions on Power Delivery. 2009;24(1):195–201. https://doi.org/10.1109/tpwrd.2008.2005882
17. Andreev MV, Ruban NYu, Suvorov AA, Ufa RA. A Study of the Measurement Section of Digital Relay Protection Units. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenii. Elektromehanika* = Russian Electromechanics. 2017;5:92–98. http://dx.doi.org/10.17213/0136-3360-2017-5-92-98 (In Russ.)
18. Andreev MV, Borovikov YuS, Gusev AS, Sulaimanov AO, Suvorov AA, Ruban NYu, Ufa RA. Concept and Basic Structure of the All-Mode Modeling Complex. *Gazovaya promyshlennost'* = Gas industry of Russia 2017;5:18–27. (In Russ.)
19. Andreev MV, Suvorov AA, Askarov AB, Kievets AV. The Problem of Digital Relay Protection Numerical Simulation and its Analog-Digital (Hybrid) Solution. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* = Russian Electromechanics. 2018;6:77–83. http://dx.doi.org/10.17213/0136-3360-2018-6-77-83 (In Russ.)
20. Manual for Differential Protection 7UT6x V4.6, Siemens, 2014. *Manuals*. Available from: https://www.manualslib.com/manual/1406580/Siemens-Siprotec-4-7ut6-Series.html?page=92 [Accessed 23rd February 2018].

Критерии авторства

Андреев М.В., Суворов А.А., Киевец А.В., Рудник В.Е. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Andreev M.V., Suvorov A.A., Kievets A.V., Rudnik V.E. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андреев Михаил Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий научно-исследовательской
лабораторией моделирования
электроэнергетических систем,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
✉ e-mail: andreevmv@tpu.ru

Суворов Алексей Александрович,
кандидат технических наук,
ассистент,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
e-mail: suvorovaa@tpu.ru

Киевец Антон Владимирович,
инженер-исследователь научно-исследовательской
лаборатории моделирования
электроэнергетических систем,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
e-mail: kievec.v.l@gmail.com

Рудник Владимир Евгеньевич,
инженер-исследователь научно-исследовательской
лаборатории моделирования
электроэнергетических систем,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
e-mail: fordlp006@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail V. Andreev,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Research Laboratory
of Electric Power System Modeling,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin pr., Tomsk, 634050, Russia;
✉ e-mail: andreevmv@tpu.ru

Aleksey A. Suvorov,
Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Head of the Research Laboratory
of Electric Power System Modeling,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin pr., Tomsk, 634050, Russia;
e-mail: suvorovaa@tpu.ru

Anton V. Kievets,
Research Engineer of the Research Laboratory
of Electric Power System Modeling,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin pr., Tomsk, 634050, Russia;
e-mail: kievec.v.l@gmail.com

Vladimir E. Rudnik,
Research Engineer of the Research Laboratory
of Electric Power System Modeling,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin pr., Tomsk, 634050, Russia;
e-mail: fordlp006@mail.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.316.11
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-97-111

Влияние распределенной генерации на базе возобновляемых источников энергии с использованием силовой электроники на резонанс на гармонических частотах

© С.Б. Ахмедов, П.Л. Климов
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью является исследование влияния установок распределенной генерации на базе возобновляемых источников энергии с использованием инверторов на явление резонанса на гармонических частотах. Функция инвертора заключается в преобразовании постоянного напряжения в переменное. Инвертор использует широтно-импульсную модуляцию для генерации синусоидального выходного тока. Анализ выполнен для установок распределенной генерации с инверторной системой, подключенной к тестовой модели распределения шин IEEE 13 (IEEE 13 Node Test Feeder) в графической среде имитационного моделирования Simulink. Для исследования явления резонанса замеры частоты проводились во время анализа разложения в ряд Фурье с целью измерения искажения напряжения и тока в точке общей связи сети и распределенной генерации. Проведен анализ влияния гармоник на взаимодействие между распределительной системой и установкой распределенной генерации с инвертором, связанным с пассивным LCL-фильтром. Для изучения влияния интеграции распределенной генерации в распределительную сеть было принято рассмотреть два сценария подключения генерирующих установок. В первом сценарии изучался эффект влияния нескольких установок распределенной генерации, подключенных к разным шинам распределительной сети. Во втором сценарии изучался эффект влияния нескольких установок данного типа, подключенных к одной шине распределительной сети расчетной схемы. При этом каждый из сценариев содержит четыре замера, с равномерным наращиванием числа генерирующих блоков в каждом замере. Максимально допустимый уровень интеграции блоков распределенной генерации, подключенных к сети, принимался равным 40% от общей подключенной нагрузки. Он основан на нарушении пределов стандартного гармонического искажения напряжения. В данном исследовании также анализируется влияние нескольких установок распределенной генерации при интеграции и резонансе на частотах гармоник. Анализ влияния установок распределенной генерации, интегрированных в распределительную сеть, выполнен с использованием аналитического сравнения полученных (вычисленных) параметров коэффициентов нелинейных искажений по напряжению при моделировании работы установки распределенной генерации в сети с допустимыми пределами этих коэффициентов нелинейных искажений по напряжению в соответствии с ГОСТ в части сетей низкого напряжения. Приводятся результаты численных экспериментов.

Ключевые слова: распределенная генерация, резонанс, гармонические искажения, преобразователь, коэффициент нелинейных искажений, инвертор

Информация о статье: Дата поступления 21 октября 2019 г.; дата принятия к печати 26 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: 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

Effect of renewable energy-based distributed generation with power invertors on resonance at harmonic frequencies

Sardor B. Akhmedov, Pavel L. Klimov
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the article is to study the influence of distributed generation installations based on renewable energy sources using inverters on the resonance at harmonic frequencies. The function of the inverter is to convert DC voltage into AC. The inverter uses pulse width modulation (PWM) to generate a sinusoidal output current. The analysis is performed for distributed generation installations with an inverter system connected to the IEEE 13 Node Test Feeder in

the Simulink graphical simulation environment. To study the phenomenon of resonance, frequency is measured during the analysis of the Fourier series expansion in order to measure voltage and current distortions at the point of general connection of the network and distributed generation. The influence of harmonics on the interaction between the distribution system and the distributed generation unit with an inverter connected to a passive LCL filter is analyzed. In order to study the effect of distributed generation integration into the distribution network, it has been decided to consider two scenarios of generating plant connection. In the first scenario, the effect of several distributed generation installations connected to different buses of the distribution network is researched. In the second scenario, the effect of several installations of the given type connected to one bus of the design circuit distribution network is studied. In addition, each of the scenarios contains four measurements with a uniform increase in the number of generating units in each measurement. The maximum permissible integration level of distributed generation units connected to the grid is assumed to be equal to 40% of the total connected load. It is based on breaking the limits of standard harmonic voltage distortion. This study also analyzes the effect of multiple distributed generators under integration and resonance at harmonic frequencies. The analysis of the influence of distributed generation installations integrated into the distribution network has been carried out with the application of an analytical comparison of the obtained (calculated) parameters of voltage non-linear distortion coefficients when modeling distributed generator operation in the network with permissible limits for these coefficients of voltage non-linear distortions in accordance with low voltage network GOST. The results of numerical experiments are presented.

Keywords: distributed generation, resonance, harmonic distortions, converter, nonlinear distortion coefficient, inverter

Information about the article: Received October 21, 2019; accepted for publication December 26, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Akhmedov SB, Klimov PL. Effect of renewable energy-based distributed generation with power invertors on resonance at harmonic frequencies. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):97–111. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-97-111

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие распределенной генерации (РГ) в России становится более актуальным в связи с обеспечением электроэнергией отдаленных поселков и деревень, а также ростом предложения относительно доступных коммерческих установок РГ на базе возобновляемых источников энергии. Однако крупные установки РГ могут вносить отрицательный вклад в искажение параметров качества электроэнергии, выдаваемой в локальную сеть. Параметры качества электроэнергии могут быть приведены к допустимым параметрам с использованием вставки постоянного тока. Однако пассивные фильтры гармоник оказывают негативный эффект при явлении резонанса.

Гармонические искажения, создаваемые установкой РГ при выдаче энергии в сеть, зависят от типа генерирующей установки и технологий силовой электроники. В целом подключение РГ можно разделить на два типа: РГ с преобразователем (силовой электроникой) и РГ без преобразователя [1]. Например, РГ с преобразователем используется в распределенной генерации на базе солнечных панелей, ветровых турбин, топливных элементов и микротурбин, которые используют силовую электронику для сопряжения (связи) с сетью, в то время как синхронные генераторы используются без промежуточного преобразования, т.е. без преобразователя.

Резонанс на частотах гармоник связан с интеграцией РГ в сеть и становится критическим техническим вопросом для энергосистемы при увеличении числа установок РГ. Данный резонанс может произойти в точке соединения одиночной или нескольких установок РГ к сети из-за несоответствия полного сопротивления между ними (между РГ и сетью). Более того, данное несоответствие распространяет гармоники на генерирующее оборудование, например, приводы с регулируемой скоростью, что может привести к увеличению потерь и сокращению времени эксплуатации оборудования в системе. Кроме того, оборудование может быть повреждено перегрузками по току или перенапряжениями, которые возникают из-за резонанса [2–4].

Динамическое взаимодействие между сетью и инвертором может привести к дополнительному резонансу в токе или напряжении сети (либо в обоих). Явление может происходить на определенных частотах (которые не характерны для полного

сопротивления сети), создаваемых одним инвертором или при подключении к идеальной сети. Эффект этого резонанса не только создает серьезную проблему качества электроэнергии, но также может привести к отключению защитных устройств и повреждению чувствительного оборудования [5].

В [6] сообщалось, что более глубокое проникновение фотоэлектрических инверторов, связанных с LCL-фильтрами для систем рекуперации электрической энергии при определенных обстоятельствах влияет на систему с точки зрения нежелательных срабатываний. Это значительно увеличивает генерацию гармоник, даже если фотоэлектрические преобразователи индивидуально удовлетворяют ограничениям по гармоникам. В [6, 7] сообщалось, что параллельные и последовательные резонансные явления между сетью и фотоэлектрическими инверторами были признаны ответственными за неожиданные высокие уровни тока и искажения напряжения в фотоэлектрической сети.

2. МОДЕЛЬ УСТАНОВКИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В зависимости от типа источников энергии для РГ требуются различные конфигурации силовых электронных преобразователей. Однако для анализа гармоник РГ при моделировании предполагается, что напряжение постоянного тока является постоянным. Это предположение может быть оправдано большой емкостью в цепи постоянного тока и контроллером (регулятором) напряжения постоянного тока, который поддерживает напряжение на близком к номинальному уровне. Используя данное предположение, установка РГ может быть представлена инвертором напряжения, питаемым от источника постоянного тока [8]. На рис. 1 показаны основные компоненты данного инвертора. Система состоит из источника постоянного тока, инвертора, контроллера P-Q (регулятора активной и реактивной мощностей) и пассивного фильтра LCL.

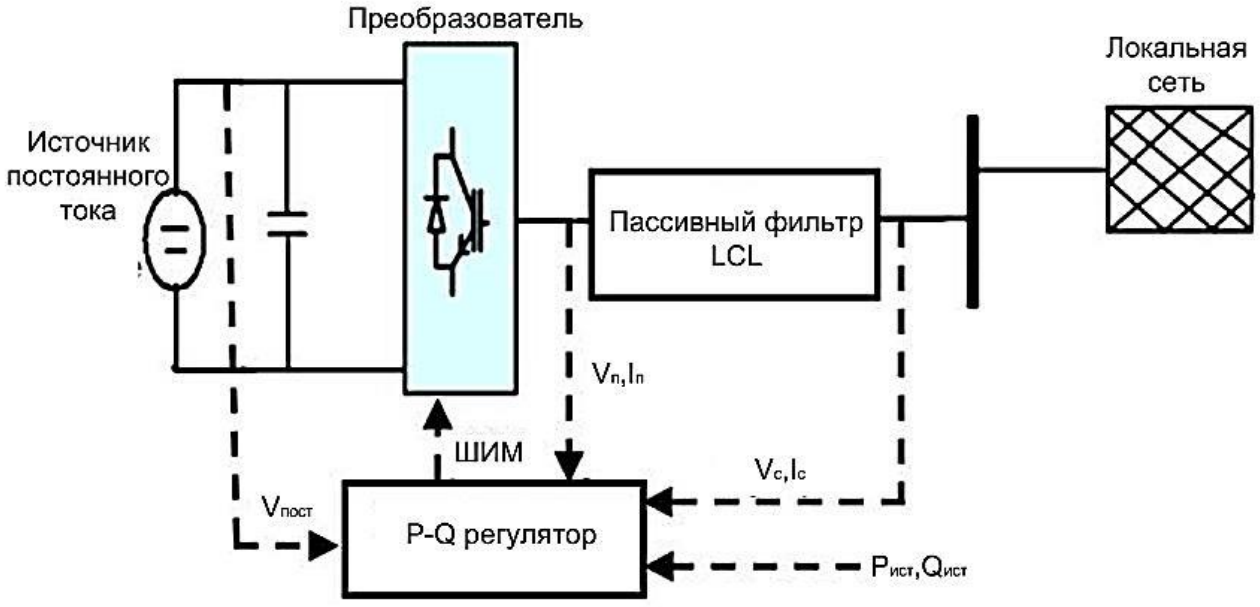


Рис. 1. Инвертор напряжения ($V_{\text{пост}}$ – напряжение источника постоянного тока, $V_{\text{п}}$ – напряжение на входе в преобразователь, $I_{\text{п}}$ – ток на входе в преобразователь, $V_{\text{с}}$ – напряжение сети, $I_{\text{с}}$ – ток сети, $P_{\text{ист}}$ – активная мощность источника регулятора, $Q_{\text{ист}}$ – реактивная мощность источника регулятора)

Fig. 1. Voltage inverter ($V_{\text{пост}}$ – voltage of the DC source, $V_{\text{п}}$ – voltage at the converter input, $I_{\text{п}}$ – current at the converter input, $V_{\text{с}}$ – mains voltage, $I_{\text{с}}$ – mains current, $P_{\text{ист}}$ – active power of the controller source, $Q_{\text{ист}}$ – reactive power of the controller source)

Функция инвертора заключается в преобразовании постоянного напряжения в переменное. Данный инвертор использует широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) для генерации синусоидального выходного тока путем переключения элемента биполярного транзистора с изолированным затвором (IGBT-транзистор) в инверторе. Чтобы подключить инвертор напряжения к сети, требуется пассивный LCL-фильтр для устранения гармоник тока, создаваемых ШИМ – переключающим инвертором.

Контроллер инвертора используется для управления напряжением линии постоянного тока РГ, реактивной мощности и коэффициента мощности. Контур управления инвертором может быть получен из отношения между инвертором и напряжением сети за полным сопротивлением его сети (рис. 2) [9].

Модель пассивного LCL-фильтра может быть получена в стационарной системе координат с использованием законов Кирхгофа, как изложено ниже (1)–(3) [9, 10]:

$$I_i - I_c - I_g = 0\,; \tag{1}$$

$$V_i - V_c = L_i \frac{dI_i}{dt}\,; \tag{2}$$

$$V_c - V_g = L_g \frac{dI_g}{dt}. \tag{3}$$

Связь между выходным напряжением преобразователя (V_i) и напряжением сети с учетом падения напряжения на LCL-фильтре:

$$V_i = V_g + L_g \frac{dI_g}{dt} + L_i \frac{dI_i}{dt}. \tag{4}$$

После преобразования во вращающуюся систему координат в положительном направлении напряжения сети, получаем уравнение:

$$V_{id} = V_{gd} + L_g \frac{dI_{gd}}{dt} - \omega L_g I_{gd} + \\ + L_i \frac{dI_{id}}{dt} - \omega L_i I_{iq}\,, \tag{5}$$

где мнимая составляющая может быть выражена как

$$V_{iq} = V_{gq} + L_g \frac{dI_{gq}}{dt} + \omega L_g I_{gd} + \\ + L_i \frac{dI_{iq}}{dt} + \omega L_i I_{id}. \tag{6}$$

Во вращающейся системе координат, ориентированной на напряжение, $V_{gd} = |V_{gd}|$ и $V_{iq} = 0$. Если $V_{iq} = 0$, оно не исключается из уравнений для того чтобы вывести уравнение регулятора.

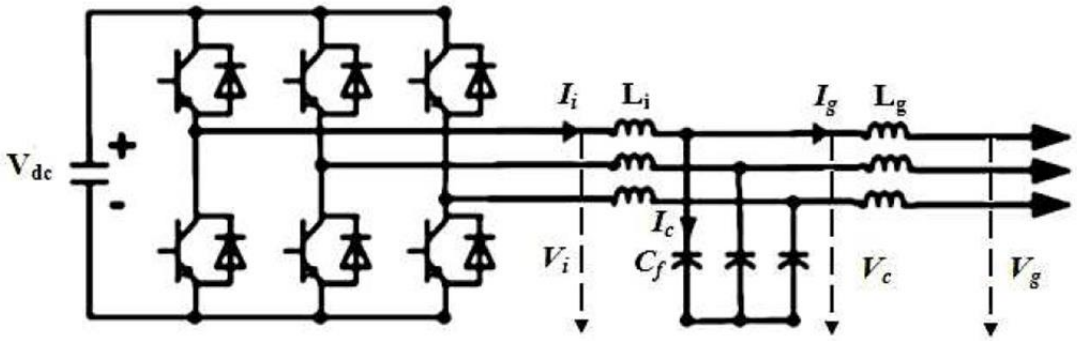


Рис. 2. Подключение инвертора напряжения к сети через LCL-фильтр (V_{dc}– напряжение источника постоянного тока, V_i – напряжение на входе в LCL-фильтр, I_i – ток на входе в LCL-фильтр, L_i – индуктивность LCL-фильтра, I_c – ток емкости LCL-фильтра, C_f – емкость LCL-фильтра, I_g – ток сети, V_c – ток емкости LCL-фильтра, L_g – индуктивность сети, V_g – напряжение сети)
Fig. 2. Voltage inverter connection to the grid through the LCL filter (V_{dc} –voltage of the DC source, V_i – voltage at the LCL filter input, I_i – current at the LCL filter input, L_i – LCL filter inductance, I_c –current of the LCL filter capacitance, C_f – LCL- filter capacity, I_g – grid current, V_c – current of the LCL filter capacitance, L_g – grid inductance, V_g – grid voltage)

Для вывода уравнения регулятора падение напряжения на LCL-фильтре рассматривается как выход для пропорционально-интегрального контроллера (ПИ-контроллер):

$$L_g \frac{dI_{gd}}{dt} + L_i \frac{dI_{id}}{dt} = \\ = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_1}\right)\left(I_{id_{ref}} - I_{id}\right); \quad (7)$$

$$L_g \frac{dI_{gq}}{dt} + L_i \frac{dI_{iq}}{dt} = \\ = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_1}\right)\left(I_{iq_ref} - I_{iq}\right). \quad (8)$$

Подставляя уравнение (7) в уравнение (5), а (8) в (6), получаем уравнения инвертора напряжения в следующем виде:

$$V_{id_ref} = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_1}\right)\left(I_{id_ref} - I_{id}\right) + V_{gd} - \\ \omega L_g I_{gq} - \omega L_i I_{iq}; \quad (9)$$

$$V_{iq_ref} = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_1}\right)\left(I_{iq_ref} - I_{iq}\right) + V_{gq} + \\ \omega L_g I_{gd} + \omega L_i I_{id}. \quad (10)$$

Внутренний контур тока для контроллера инвертора может быть получен из уравнений (9) и (10), как показано на рис. 3 [10].

В ориентированной по напряжению системе отсчета I_{id} равно активному току, а I_{iq} – отрицательной величине реактивного тока. Активный ток рассчитывается из контура управления, который контролирует напряжение звена постоянного тока для *d*-оси. Реактивный ток генерируется контуром, который контролирует выходное напряжение переменного тока для *q*-оси.

На рис. 4 показан внешний цикл управления инвертором. Во внешнем контуре управления напряжением постоянного тока активный ток от источника РГ подается с опережением для повышения производительности контроллера. Цикл основан на схеме управления P-Q, которая позволяет независимо управлять выходами активной и реактивной мощностей. Эти два контура управления являются общей структурой контроллера для модели установки РГ.

На рис. 5 показана модель установки РГ с инвертором в блоке для имитационного моделирования электротехнических устройств MATLAB – SimPowerSystems. Он основан на блок-схеме, изображенной на рис. 1 и вышеупомянутых способах управления. Модель распределения шин IEEE 13 (IEEE 13 Node Test Feeder) находится в блоке подсистемы сети.

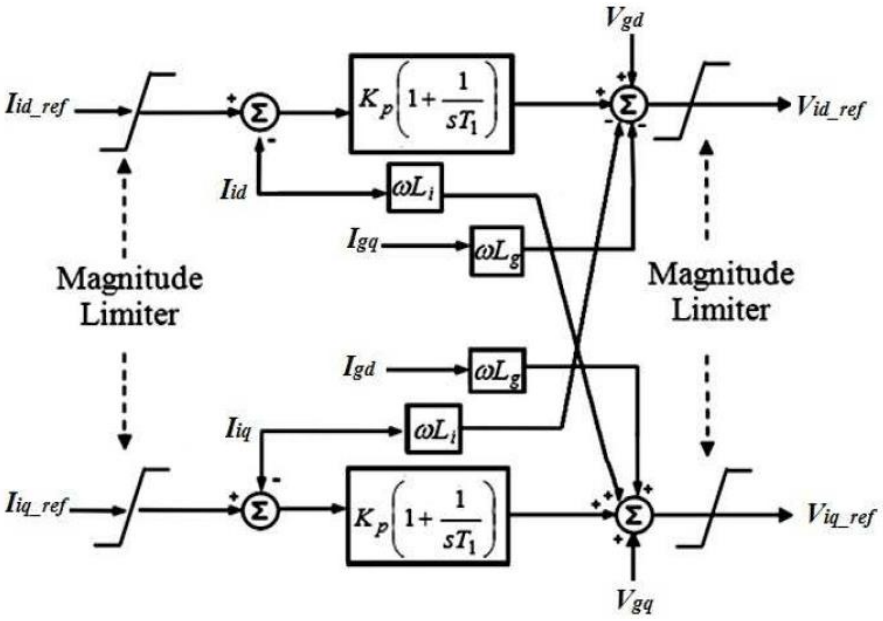


Рис. 3. Внутренний контур управления инвертора (magnitude limiter – ограничитель величины)
Fig. 3. Inverter inner control loop with a magnitude limiter

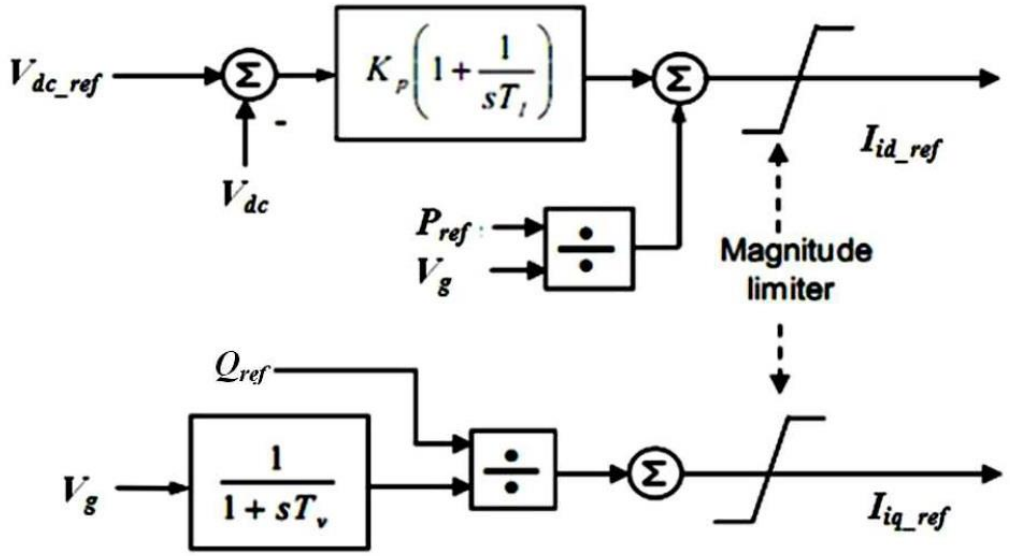


Рис. 4. Внешний цикл управления инвертором
Fig. 4. Inverter outer control loop

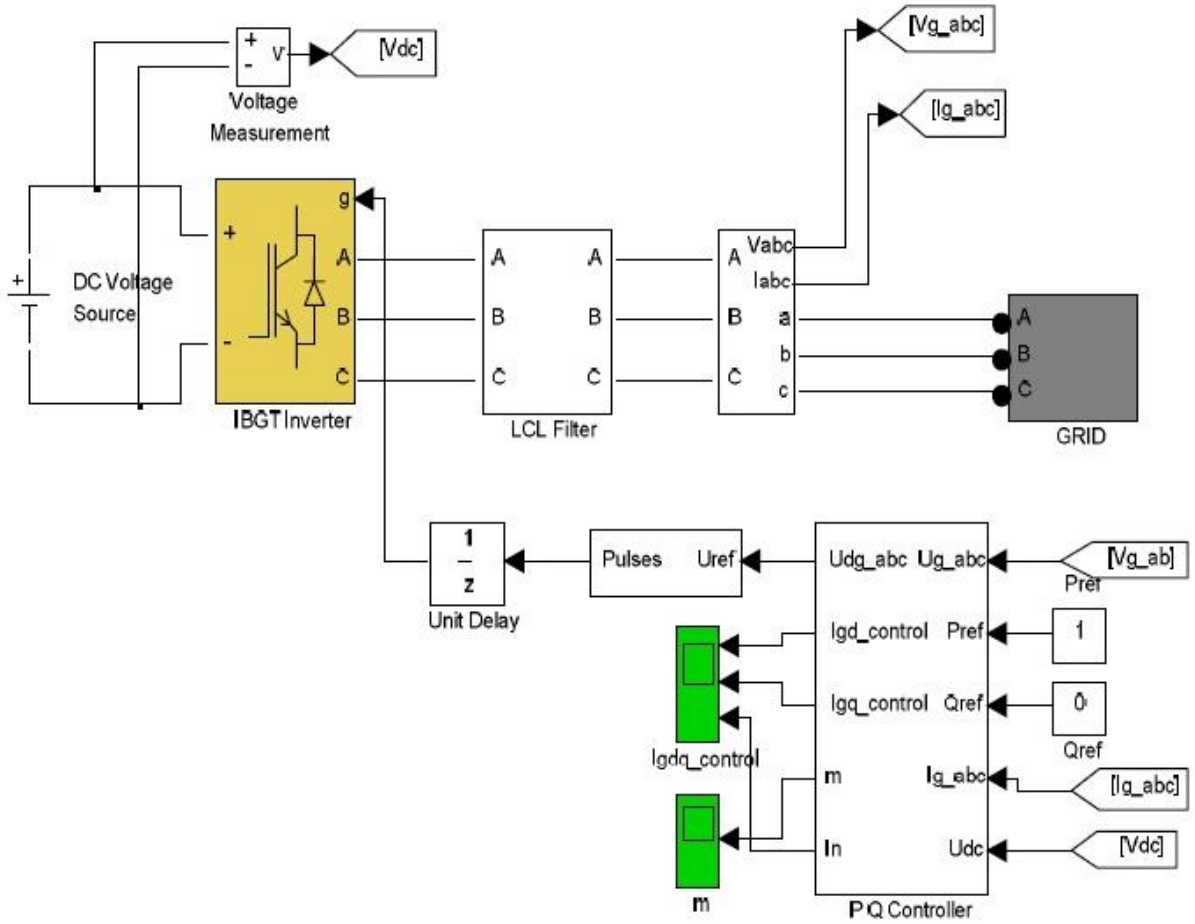


Рис. 5. Моделирование установки распределенной генерации с инвертором в системе MATLAB – SimPowerSystems
Fig. 5. Modeling of a distributed generator and inverter in MATLAB – SimPowerSystem

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ТЕСТ С МОДЕЛЬЮ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ШИН IEEE 13 (IEEE 13 NODE TEST FEEDER)

Тестовая модель распределения шин IEEE 13 в графической среде имитационного моделирования Simulink изображена на рис. 6. Система несбалансированная и служит эталонной системой для исследований несбалансированного распространения гармоник. Для создания подходящих условий для эксперимента исходная система шин IEEE 13 модифицируется путем добавления нелинейной нагрузки (привод с регулируемой скоростью) на шину 680 и установок РГ с инвертором на шинах 633, 675 и 680.

Конденсатор для коррекции коэффициента мощности и дополнительные узлы нагрузки размещаются таким же образом, как и в оригинальной системе тестирования IEEE 13. Спектр тока для модели привода с регулируемой скоростью приведен в [4]. Конденсатор для коррекции коэффициента и нагрузка моделируются как статический конденсатор и статическая нагрузка, соответственно. В данном исследовании было проанализировано влияние нескольких установок РГ на разных шинах подключения. Общая подключенная нагрузка системы составляет 3,2 МВт. Общая мощность установок РГ представляет 40% от общей подключенной нагрузки, что составляет 1280 кВт.

4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Целью исследования является влияние установок РГ в распределительной сети на резонанс на гармонических частотах в ней. Резонанс частоты системы может существенно измениться, когда резонанс сети становиться ближе к гармоническим частотам вводимых установок РГ в систему.

Резонансная частота системы может значительно измениться, когда резонанс сети становится ближе к гармоническим частотам, вводимым РГ в систему. Как было упомянуто выше, установки РГ, подключенные к шинам со специфическими условиями (где используется конденсатор для коррекции коэффициента мощности и привод с регулируемой скоростью), установлены на шине 675 и шине 680, соответственно, как показано на рис. 6.

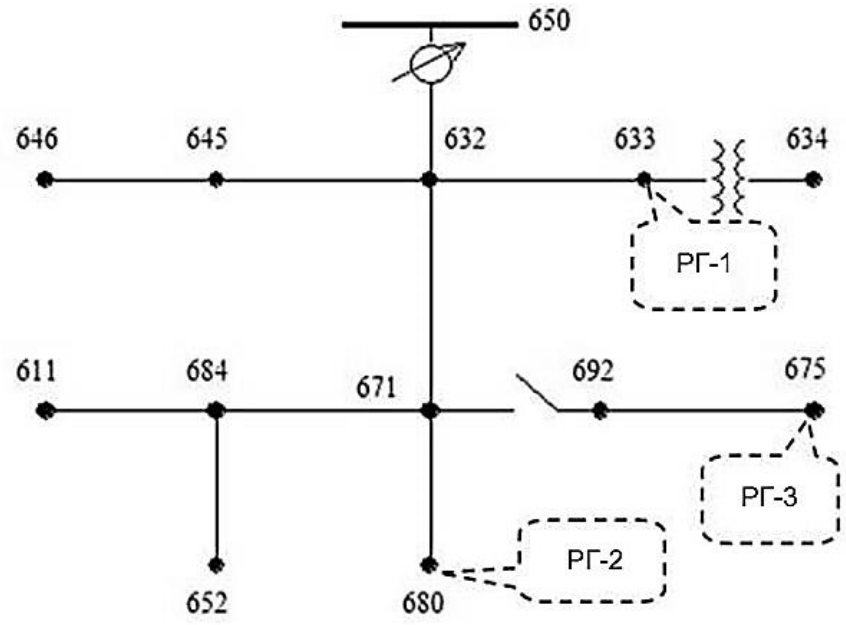


Рис. 6. Тестовая модель распределения шин IEEE 13
Fig. 6. IEEE 13 Node Test Feeder

Для изучения влияния было принято провести два сценария, один был создан для изучения эффекта влияния нескольких установок РГ на разных шинах распределительной сети, второй – для изучения влияния нескольких установок РГ на шине 633.

Первый сценарий был разделен на четыре замера параметров со следующими условиями:

1 замер – без подключения установок РГ;

2 замер – одна установка РГ (РГ-1), подключенная к шине 633;

3 замер – две установки РГ (РГ-1 и РГ-2), подключенные к шинам 633 и 680;

4 замер – три установки РГ (РГ-1, РГ-2 и РГ-3), подключенные к шинам 633, 680 и 675.

Второй сценарий также был разделен на четыре замера параметров со следующими условиями:

1 замер – без подключения установок РГ;

2 замер – одна установка РГ, подключенная к шине 633;

3 замер – две установки РГ, подключенные к шине 633;

4 замер – три установки РГ, подключенные к шине 633.

При этом суммарная мощность РГ в распределительной сети остается постоянной в обоих сценариях и равной 40% от общей нагрузки в независимости от увеличения числа установок РГ на шинах.

На рис. 7 показан замер частоты в системе для каждой фазы, когда установки РГ подключены к различным шинам. Из полученных результатов (рис. 7) можно наблюдать, что одиночный пик резонанса частоты имеет место в замере при отсутствии установки РГ, но с наличием конденсатора для коррекции коэффициента мощности. Однако когда установка РГ подключена к сети, можно наблюдать две резонансные частоты, что указывает на то, что установки РГ с преобразователем, связанные с LCL-фильтром, оказывают значительное влияние на явление резонанса в энергосистеме. При увеличении числа установок РГ в распределительной сети характер явления резонанса также меняется. Однако только небольшое различие было установлено между подключением двух и трех установок РГ. Подробные результаты замера частоты на рис. 7 (пиковые значения последовательного и параллельного явлений резонанса) представлены в табл. 1, 2.

На рис. 8 показаны замеры частоты в системе для каждой фазы, когда установки РГ подключены к шине 633. Из полученных результатов (см. рис. 8) можно наблюдать, что одиночный пик резонанса частоты имеет место в замере при отсутствии установки РГ, но с наличием конденсатора для коррекции коэффициента мощности. Однако когда установка РГ подключается к сети, можно наблюдать две резонансные частоты, что указывает на то, что установки РГ с

Таблица 1

Пиковые значения частоты при параллельном резонансе (резонанс тока) на шинах 633, 680 и 675 (первый сценарий)

Table 1

Peak frequency values under parallel resonance (resonance of current) at buses 633, 680 and 675 (the first scenario)

№ замера	Первый пик (*n*-й гармоники)			Второй пик (*n*-й гармоники)		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
1	304 (6-я)	263 (5-я)	238 (5-я)	–	–	–
2	262 (5-я)	263 (5-я)	216 (4-я)	740 (15-я)	730 (15-я)	710 (14-я)
3	230 (5-я)	256 (5-я)	212 (4-я)	974 (19-я)	966 (19-я)	944 (19-я)
4	210 (4-я)	226 (5-я)	198 (4-я)	964 (19-я)	956 (19-я)	940 (19-я)

ISSN 1814-3520

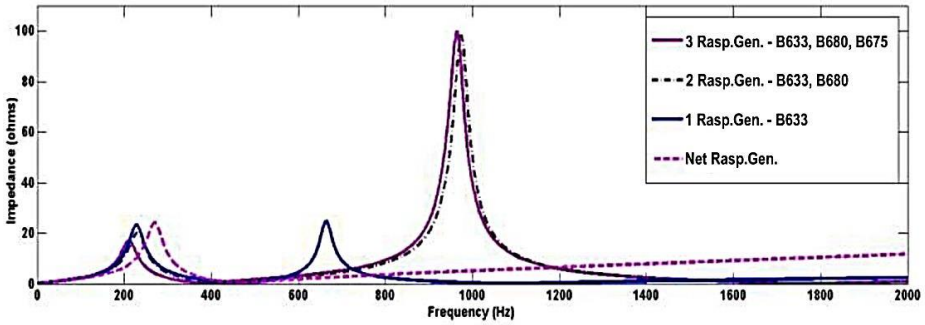
Таблица 2

Пиковые значения частоты при последовательном резонансе (резонансе напряжений) на шинах 633, 680 и 675 (первый сценарий)

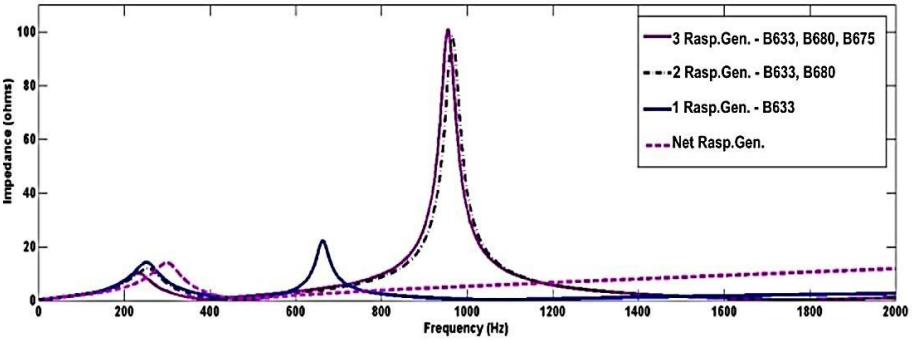
Table 2

Peak frequency values under series resonance (resonance of voltage) at buses 633, 680 и 675 (the first scenario)

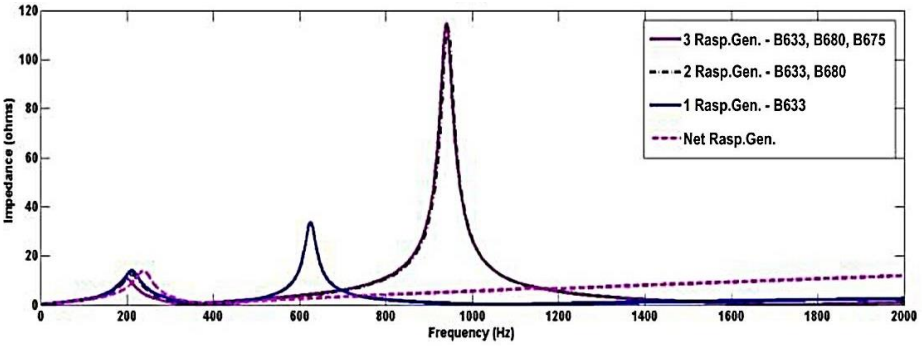
№ замера	Первый пик (*n*-й гармоники)			Второй пик (*n*-й гармоники)		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
1	489 (10-я)	460 (9-я)	382 (8-я)	–	–	–
2	489 (10-я)	460 (9-я)	382 (8-я)	1220 (24-я)	1214 (24-я)	1203 (24-я)
3	424 (8-я)	436 (8-я)	372 (7-я)	1764 (35-я)	1750 (35-я)	1736 (35-я)
4	394 (8-я)	404 (8-я)	350 (7-я)	1764 (35-я)	1750 (35-я)	1736 (35-я)



a



b



c

Рис. 7. Замеры частоты при явлении резонанса по фазе А (a), фазе В (b), фазе С (c) в модели распределения шин IEEE 13

Fig. 7. Frequency measurements under resonance by phase A (a), phase B (b), phase C (c) in IEEE 13 Node Test Feeder

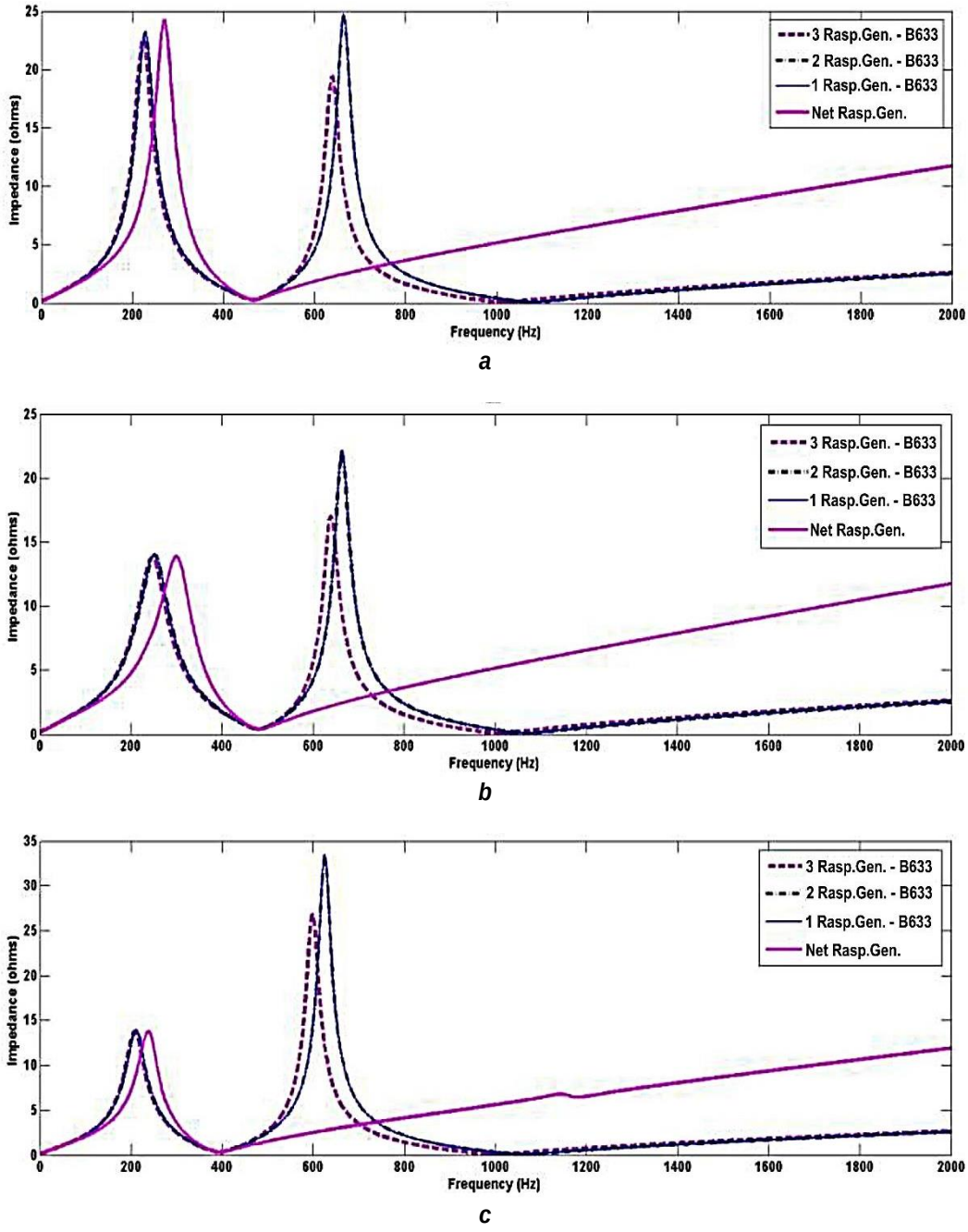


Рис. 8. Замеры частоты при явлении резонанса по фазе A (a), фазе B (b), фазе C (c) в модели распределения шин IEEE 13 на шине 633
Fig. 8. Frequency measurements under resonance by phase A (a), phase B (b), phase C (c) in IEEE 13 Node Test Feeder at the bus 633

преобразователем, связанные с LCL-фильтром, оказывают значительное влияние на явление резонанса в энергосистеме. Из полученных результатов видно, что форма резонанса такая же, как и в предыдущем сценарии. Подробные результаты замера частоты на рис. 8 представлены в табл. 3, 4 (пиковые значения последовательного и параллельного резонансов).

Коэффициенты нелинейных искажений (КНИ) по току и напряжению для шины 632 по первому сценарию представлены в табл. 5, которые получены через преобразование Фурье (разложения в ряд). Из полученных результатов видно, что при отсутствии РГ в распределительной сети параллельный резонанс все же происходит, а также наблюдается искажение тока и

напряжения из-за присутствия привода с регулируемой скоростью на шине 680. Величина частоты резонанса близка к частоте гармоники на фазе А, также можно отметить, что максимальный коэффициент нелинейных искажений напряжения близок к пределу гармонического искажения равному 5% (в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 32144-2013[1]). Однако фаза В и С не подвергаются резонансу на гармонических частотах.

С другой стороны, когда одна установка РГ подключена к распределительной сети, частота последовательного резонанса в системе близка к гармонической частоте, то происходит скачок искажения тока. При подключении двух установок РГ в распределительную сеть последовательный резонанс также присутствует в сети.

КНИ по току незначительно возрастают, а коэффициенты нелинейных искажений по напряжению остаются в допустимых пределах. Когда три установки РГ подключены к распределительной сети, параллельный резонанс присутствует на фазе С, а последовательный резонанс остается как в предыдущем случае (при работе двух РГ). КНИ по напряжению возрастают, но не превышают пределов, в то время как суммарные гармонические искажения по току происходят в системе. КНИ по напряжению и току на шине 632 по второму сценарию представлены в табл. 6, которые получены через преобразование Фурье. Из полученных результатов видно, что первые два замера такие же, как и в предыдущем (первом) сценарии.

Таблица 3

Пиковые значения частоты при параллельном резонансе (резонанс тока) на шинах 633 (второй сценарий)

Table 3

Peak frequency values under parallel resonance (resonance of current) at the bus 633 (the second scenario)

№ замера	Первый пик (*n*-й гармоники)			Второй пик (*n*-й гармоники)		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
1	304 (6-я)	264 (5-я)	238 (5-я)	–	–	–
2	262 (5-я)	232 (5-я)	216 (4-я)	740 (15-я)	730 (15-я)	710 (14-я)
3	228 (5-я)	252 (5-я)	212 (4-я)	664 (13-я)	664 (13-я)	626 (13-я)
4	224 (4-я)	246 (5-я)	208 (4-я)	638 (13-я)	640 (13-я)	598 (12-я)

Таблица 4

Пиковые значения частоты при последовательном резонансе (резонансе напряжений) на шинах 633 (второй сценарий)

Table 4

Peak frequency values under series resonance (resonance of voltages) at the bus 633 (the second scenario)

№ замера	Первый пик (*n*-й гармоники)			Второй пик (*n*-й гармоники)		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
1	489 (10-я)	460 (9-я)	382 (8-я)	–	–	–
2	489 (10-я)	460 (9-я)	382 (8-я)	1220 (24-я)	1214 (24-я)	1203 (24-я)
3	466 (9-я)	482 (10-я)	418 (8-я)	1086 (22-я)	1078 (22-я)	1068 (21-я)
4	456 (9-я)	482 (10-я)	418 (8-я)	1018 (20-я)	1024 (20-я)	986 (20-я)

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

Таблица 5

Коэффициенты нелинейных искажений по току и напряжению на шине 632 при подключении распределенной генерации к шинам 633, 680 и 675 (первый сценарий)

Table 5

Harmonic distortion factors for voltage and current measured at the bus 632 for connected distributed generation to buses 633, 680 and 675 (the first scenario)

№ замера	Коэффициент нелинейных искажений по напряжению, %			Коэффициент нелинейных искажений по току, %		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
1	4,76	3,65	2,23	3,17	3,00	0,90
2	2,20	2,98	1,68	3,83	2,44	1,36
3	2,32	2,97	1,51	6,5	6,28	4,78
4	2,18	2,83	3,29	6,71	6,23	4,24

Таблица 6

Коэффициенты нелинейных искажений по току и напряжению на шине 632 при подключении распределенной генерации к шине 633 (второй сценарий)

Table 6

Harmonic distortion factors for voltage and current measured at the bus 632 for connected distributed generation to the bus 633 (the second scenario)

№ замера	Коэффициент нелинейных искажений по напряжению, %			Коэффициент нелинейных искажений по току, %		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
1	4,76	3,65	2,23	3,17	3,00	0,90
2	2,20	2,98	1,68	3,83	2,44	1,36
3	4,03	4,69	4,16	1,54	2,08	5,31
4	4,74	4,01	2,23	5,65	5,44	1,33

Однако при подключении двух установок РГ в сеть к шине 633 частота параллельного резонанса в системе близка к гармонической частоте, происходит скачок искажения напряжения. При этом КНИ по напряжению не превышают пределов. Параллельный резонанс присутствует на фазе С, что влечет за собой искажение по току. При подключении трех установок РГ в распределительную сеть в системе также присутствуют параллельный и последовательный резонансы. КНИ по напряжению и току возрастают, но не превышают допустимых пределов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования показывают, что присутствие установок РГ оказывает влияние на возникновение параллельных и последовательных резонансов на гармонических частотах вследствие взаимодействия установок РГ с преобразователем с пассивным LCL-фильтром, конденсатором для коррекции коэффициента мощности и полным сопротивлением сети. При резонансе на гармонических частотах происходит и увеличение искажение тока и напряжения. Результаты моделирования влияния установок РГ на распределительную систему с уровнем интеграции 40% и различной конфигурацией показывают, что интеграция установок РГ в распределительную сеть не нарушает допустимых пределов коэффициентов нелинейных искажений по напряжению в соответствии с установленными требованиями[1].

Библиографический список

1. Dugan R.C., McDermott T.E., Ball G.J. Distribution Planning for Distributed Generation // Rural Electric Power Conference (Louisville, 7–9 May 2000). Louisville: IEEE, 2000. P. 1–7. https://doi.org/10.1109/REPCON.2000.848048
2. Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks. Part 1: Concepts, Model, and Simulation Techniques // IEEE Transaction on Power Delivery. 1996. Vol. 11. Issue 1. P. 452–465. https://doi.org/10.1109/61.484130
3. Xin Chen, Jian Sun. A Study of Renewable Energy System Harmonic Resonance based on a DG Test-Bed // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) (Fort Worth, 6–11 March 2011). Fort Worth: IEEE, 2011. P. 995–1002. https://doi.org/10.1109/APEC.2011.5744716
4. Enslin J.H.R., Hulshorst W.T.J., Atmadji A.M.S., Heskes P.J.M., Kotsopoulos A., Cobben J.F.G. Harmonic Interaction between large Numbers of Photovoltaic Inverters and the Distribution Network // Bologna Power Tech Conference Proceedings (Bologna, 23–26 June 2003). Bologna: IEEE, 2003. P. 1–6. https://doi.org/10.1109/PTC.2003.1304365
5. Kadir A.F.A., Mohamed A., Shareef H., Wanik M.Z.C. Impact of Multiple Inverter Based Distributed Generation Units on Harmonic Resonance [Электронный ресурс]. URL: https://www.academia.edu/17688247/Impact_of_Multiple_Inverter_Based_Distributed_ Generation_Units_on_Harmonic_Resonance (12.04.2019).
6. Donghua Pan, Xiongfei Wang, Blaabjerg F., Hong Gong. Active Damping of LCL-Filter Resonance Using a Digital Resonant-Notch (Biquad) Filter // Event 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe) (Riga, 17–21 September 2018). Riga: IEEE, 2018. P. 8515419.
7. Lombardi P., Sokolnikova T., Suslov K., Voropai N., Styczynsky Z.A. Isolated power system in Russia: a chance for renewable energy // Renewable Energy. 2016. Vol. 90. P. 532–541. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.016
8. Perez-Arriaga I.J., Verghese G.C., Schweppe F.C. Selective Modal Analysis With Applications to Electric Power Systems. PART I: Heuristic Introduction // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1982. Vol. PAS-101. Issue 9. P. 3117–3125. https://doi.org/10.1109/TPAS.1982.317524
9. Denis Lee Hau Aik, Andersson G. Use of participation factors in modal voltage stability analysis of multi-infeed HVDC systems // IEEE Transactions on Power Delivery. 1998. Vol. 13. No. 1. P. 203–211. https://doi.org/10.1109/61.660879
10. Солодуша С.В., Герасимов Д.О., Суслов К.В. Построение интегральной модели на примере динамики ветроэнергетической установки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2015. Т. 8. Вып. 4. С. 40–49. https://doi.org/10.14529/mmp150404
11. Cousins Bu.J.T. Using time of use tariffs in industrial, commercial and residential applications effectively in Sandton // TLC Engineering Solutions [Электронный ресурс]. URL: http://www.tlc.co.za/white_papers/pdf/using_time_of_use_tariffs_in_industrial_commercial_and_residential_applications_effectively.pdf (12.04.2019).
12. Gualtieri M., Curran R., Kisker H., Christakis S. The Forrester Wave™ // Big Data Predictive Analytics Solutions [Электронный ресурс]. URL: URL:https://www.forrester.com/The+Forrester+Wave+Big+Data+Predictive+Analytics+Solutions+Q2+2015/fulltext/-/E-res115697 (12.04.2019).
13. Halper F. Predictive Analytics for Business Advantage // RESEARCH & RESOURCES [Электронный ресурс]. URL: URL:http://tdwi.org/research/2013/12/best-practices-report-predictive-analytics-for-business-advantage.aspx?tc=page0 (12.04.2019).
14. Kotorov R. Enhancing Decision-Making, Cost-Efficiency, and Profitability With Predictive Analytics // The Information Builders [Электронный ресурс]. URL: https://docplayer.net/5775932-Enhancing-decision-making-cost-efficiency-and-profitability-with-predictive-analytics.html (15.04.2019).
15. Siegel E. Seven Reasons You Need Predictive Analytics Today // Prediction Impact Inc. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ibm.com/downloads/cas/LKMPR8AJ (15.04.2019).
16. White D. Predictive Analytics: The Right Tool for Tough Times. An Aberdeen Group white paper // Aberdeen Group [Электронный ресурс]. URL: https://www.scribd.com/user/344300379/api-344300379 (11.04.2019).
17. ParrRud O. Drive Your Business with Predictive Analytics // SAS Institute [Электронный ресурс]. URL: https://docplayer.net/985480-Drive-your-business-with-predictive-analytics.html (11.04.2019).
18. Taylor J. Analytics Capability Landscape. Identifying the right analytic capabilities for success // Decision Management Solutions [Электронный ресурс]. URL: http://www.decisionmanagementsolutions.com/wp-content/uploads/2015/02/Analytics-Capability-Landscape-Report-Final-3.17.15.pdf (11.04.2019).
19. Stefanovic N. Proactive Supply Chain Performance Management with Predictive Analytics // The Scientific World Journal. 2014. P. 121–138. http://dx.doi.org/10.1155/2014/528917
20. Eckerson W. Making Predictive Analytics Pervasive, Benchmark Report // TechTarget, Search Business Analytics [Электронный ресурс]. URL: http://docs.media.bitpipe.com/io_11x/io_116391/item_923163/051514_EB_Making%20Predictive%20Analytics%20Pervasive.pdf (15.04.2019).

References

1. Dugan RC, McDermott TE, Ball GJ. Distribution Planning for Distributed Generation. In: Rural Electric Power Conference. 7–9 May 2000, Louisville. Louisville: IEEE; 2000, p. 1–7. https://doi.org/10.1109/ REPCON.2000.848048
2. Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks. Part 1: Concepts, Model, and Simulation Techniques. IEEE Transaction on Power Delivery. 1996;11(1):452–465. https://doi.org/ 10.1109/61.484130
3. Xin Chen, Jian Sun. A Study of Renewable Energy System Harmonic Resonance based on a DG Test-Bed. In: Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 6–11 March 2011, Fort Worth. Fort Worth: IEEE; 2011, p. 995–1002. https://doi.org/10.1109/APEC.2011.5744716
4. Enslin JHR, Hulshorst WTJ, Atmadji AMS, Heskes PJM, Kotsopoulos A, Cobben JFG. Harmonic Interaction between large Numbers of Photovoltaic Inverters and the Distribution Network. In: Bologna Power Tech Conference Proceedings. 23–26 June 2003, Bologna. Bologna: IEEE; 2003, p. 1–6. https://doi.org/10.1109/PTC.2003.1304365
5. Kadir AFA, Mohamed A, Shareef H, Wanik MZC. Impact of Multiple Inverter Based Distributed Generation Units on Harmonic Resonance. Available from: https://www.academia.edu/17688247/Impact_of_Multiple_Inverter_Based_Distributed_Generation_Units_on_Harmonic_Resonance [Accessed 12th April 2019].
6. Donghua Pan, Xiongfei Wang, Blaabjerg F, Hong Gong. Active Damping of LCL-Filter Resonance Using a Digital Resonant-Notch (Biquad) Filter. In: Event 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe). 17–21 September 2018, Riga. Riga: IEEE; 2018, p. 8515419.
7. Lombardi P, Sokolnikova T, Suslov K, Voropai N, Styczynsky ZA. Isolated power system in Russia: a chance for renewable energy. Renewable Energy. 2016;90:532–541. https://doi.org/10.1016/j.renene. 2016.01.016
8. Perez-Arriaga IJ, Verghese GC, Schweppe FC. Selective Modal Analysis with Applications to Electric Power Systems. PART I: Heuristic Introduction. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1982; PAS-101(9):3117–3125.
https://doi.org/10.1109/TPAS.1982.317524
9. Denis Lee Hau Aik, Andersson G. Use of participation factors in modal voltage stability analysis of multi-infeed HVDC systems. IEEE Transactions on Power Delivery. 1998;13(1): 203–211. https://doi.org/10.1109/61.660879
10. Solodusha S.V., Gerasimov D.O., Suslov K.V. Construction of an Integral Model by the Example of Wind Turbine Dynamics. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programmirovanie* = Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modeling, Programming and Computer Software. 2015;8(4):40–49. (In Russ.) https://doi.org/ 10.14529/mmp150404
11. Cousins BuJT. Using time of use tariffs in industrial, commercial and residential applications effectively in Sandton. *TLC Engineering Solutions*. Available from: http://www.tlc.co.za/whitepapers/pdf/usingtimeofusetariffsinindustrialcommercialandresidentialapplicationseffectively.pdf [Accessed 12th April 2019].
12. Gualtieri M, Curran R, Kisker H, Christakis S. The Forrester Wave™. *Big Data Predictive Analytics Solutions.* Available from: URL:https://www. forrester.com/The+Forrester+Wave+Big+Data+Predictive+Analytics+Solutions+Q2+2015/fulltext/-/E-res115697 [Accessed 12th April 2019].
13. Halper F. Predictive Analytics for Business Advantage. *RESEARCH & RE-SOURCES*. Available from: http://tdwi.org/research/2013/12/best-practices-report-predictive-analytics-for-business-advantage.aspx?tc=page0 [Accessed 12th April 2019].
14. Kotorov R. Enhancing Decision-Making, Cost-Efficiency, and Profitability with Pre-dictive Analytics. *The Information Builders.* Available from: https://docplayer.net/5775932-Enhancing-decision-making-cost-efficiency-and-profitability-with-predictive-analytics.html [Accessed 15th April 2019].
15. Siegel E. Seven Reasons You Need Predictive Analytics Today. *Prediction Impact Inc*. Available from: https://www.ibm.com/downloads/cas/LKMPR8AJ [Accessed 15th April 2019].
16. White D. Predictive Analytics: The Right Tool for Tough Times. An Aberdeen Group white paper. *Aberdeen Group*. Available from: https://www.scribd.com/user/344300379/api-344300379 [Accessed 11th April 2019].
17. ParrRud O. Drive Your Business with Predictive Analytics. *SAS Institute*. Available from: https://docplayer.net/985480-Drive-your-business-with-predictive-analytics.html [Accessed 11th April 2019].
18. Taylor J. Analytics Capability Landscape. Identifying the right analytic capabilities for success. *Decision Management Solutions*. Available from: http://www.decisionmanagementsolutions.com/wp-content/uploads/2015/02/Analytics-Capability-Landscape-Report-Final-3.17.15.pdf [Accessed 11th April 2019].
19. Stefanovic N. Proactive Supply Chain Performance Management with Predictive Analytics. The Scientific World Journal. 2014:121–138. http://dx.doi.org/10.1155/2014/528917
20. Eckerson W. Making Predictive Analytics Pervasive, Benchmark Report. *TechTarget, Search Business Analytics* [Электронный ресурс]. URL: http://docs.media.bitpipe.com/io_11x/io_116391/item_923163/051514_EB_Making%20Predictive%20Analytics%20Pervasive.pdf [Accessed 15th April 2019].

Критерии авторства

Ахмедов С.Б., Климов П.Л. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Authorship criteria

Akhmedov S.B., Klimov P.L. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ахмедов Сардор Бахтиярович,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: sarik0696@mail.ru

Климов Павел Леонидович,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: pavel139013@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sardor B. Akhmedov,
Master Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: sarik0696@mail.ru

Pavel L. Klimov,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: pavel139013@mail.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.311, 621.331
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-112-122

Координация настроек автоматических регуляторов паротурбинной установки распределенной генерации

© Ю.Н. Булатов*, А.В. Крюков,***, Нгуен Ван Хуан*****
**Братский государственный университет, г. Братск, Россия*
***Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия*
****Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

Резюме: Цель – разработка методики координации настроек автоматических регуляторов возбуждения и скорости вращения ротора генератора паротурбинной установки распределенной генерации. Для достижения цели использовались методы цифровой обработки сигналов при выделении шума регуляторов и получение спектральных характеристик для расчета комплексных передаточных коэффициентов. В качестве инструмента оптимизации коэффициентов настройки автоматических регуляторов возбуждения и скорости применялся генетический алгоритм. Моделирование системы электроснабжения с регулируемой паротурбинной установкой распределенной генерации осуществлялось в программной среде MATLAB с применением пакетов Simulink, SimPowerSystems и специализированного программного комплекса для координации коэффициентов настройки регуляторов. Результаты исследования показывают, что координация настроек регуляторов и применение прогностических алгоритмов улучшают демпферные свойства системы, делая управление частотой и напряжением более быстрым и плавным. На основе проведенных исследований и компьютерного моделирования могут быть сформулированы следующие выводы: малая постоянная инерции роторов генераторов установок распределенной генерации требует координации настроек автоматических регуляторов возбуждения и скорости; применение автопрогностического автоматического регулятора скорости позволяет значительно улучшить демпферные свойства системы при управлении турбогенераторами установок распределенной генерации, подключаемых к статической и динамической нагрузке; автопрогностический автоматический регулятор скорости синхронного генератора может быть рекомендован для повышения эффективности регулирования частоты вращения ротора и управления регулирующими клапанами паровой турбины. Практическое использование предложенных алгоритмов настройки автоматических регуляторов возбуждения и скорости позволит повысить надежность работы установок распределенной генерации и качество процессов управления.

***Ключевые слова**:* паротурбинная установка распределенной генерации, автоматические регуляторы напряжения, автоматические регуляторы скорости, координация настроек, прогностические алгоритмы, генетический алгоритм

Информация о статье: Дата поступления 18 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 24 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

***Для цитирования**:* Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен Ван Хуан. Координация настроек автоматических регуляторов паротурбинной установки распределенной генерации. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 1. С. 112–122. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-112-122

Coordination of DG steam turbine plant automatic controller settings

Yury N. Bulatov, Andrey V. Kryukov, Nguyen Van Huan
Bratsk state University, Bratsk, Russia
Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to develop a coordination methodology for the settings of automatic controllers of generator excitation and generator rotor speed of distributed generation steam turbine plants. The methods of digital signal processing under controller noise isolation and obtaining of spectral characteristics for complex transfer coefficient calculations are used to achieve the set purpose. A genetic algorithm is used as an optimization tool for the tuning coefficients of automatic excitation and speed controllers. The power supply system with a controlled distributed generation steam turbine has been simulated in the MATLAB software environment using Simulink, SimPowerSystems packages and a specialized software package for coordination of controller setting coefficients. The results of the study show that

coordination of controller settings and application of predictive algorithms improve the damping properties of the system making frequency and voltage control faster and smoother. The conducted research and computer modeling allow to derive the following conclusions: a small constant inertia of the distributed generation plant generator rotors requires coordination of settings of automatic excitation and speed controllers; the use of an auto predictive automatic speed controller can significantly improve the damping properties of the regulator when controlling the turbogenerators of distributed generation plants connected to static and dynamic loads; the auto predictive automatic speed controller of the synchronous generator can be recommended to improve the efficiency of rotor speed regulation and controlling of steam turbine control valves. Practical use of the proposed algorithms for setting automatic excitation and speed controllers will improve the reliability of distributed generation plant operation and the quality of control processes.

Keywords: distributed generation steam turbine, automatic voltage controllers, automatic speed controllers, coordination of settings, predictive algorithms, genetic algorithm

Information about the article: Received November 18, 2019; accepted for publication December 24, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Bulatov YuN, Kryukov AV, Nguyen Van Huan. Coordination of DG steam turbine plant automatic controller settings. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):112–122. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-112-122

1. ВВЕДЕНИЕ

Технологии интеллектуальных сетей Smart Grid [1–13] предусматривают широкое внедрение установок распределенной генерации (РГ). Для промышленных объектов режим параллельной работы установок РГ с электроэнергетической системой (ЭЭС) является наиболее рациональным по экономическим и технологическим критериям. В этом случае установки РГ могут применяться для снятия пиковых нагрузок, стабилизации напряжения и частоты, а также снижения потерь электроэнергии. Однако параллельная работа установок РГ с ЭЭС усложняет задачи управления режимами и требует применения более совершенных алгоритмов настройки регуляторов. Ввиду малой постоянной инерции роторов генераторов установок РГ необходима разработка методов и алгоритмов координации настроек их регуляторов.

В статье рассматривается паротурбинная установка (ПТУ), реализованная на основе синхронного генератора с автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ) и скорости (АРС) вращения ротора. Настройка АРВ и АРС генератора ПТУ существенно влияет на качество и время демпфирования возникающих колебаний параметров. Проведенные исследования [14–16] показывают необходимость координации действий АРВ и АРС, особенно в пиковых и аварийных режимах. Поэтому при настройке систем АРВ и АРС генератора ПТУ следует учитывать их взаимосвязь. Ниже приведены результаты компьютерного моделирования, выполненного для исследования метода и алгоритма координации настроек АРВ и АРС паротурбинной установки РГ промышленного объекта.

2. ОПИСАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

Моделирование выполнялось для системы электроснабжения (СЭС) промышленного предприятия, схема которой представлена на рис. 1.

Питание СЭС осуществлялось от ЭЭС по протяженной линии электропередачи напряжением 110 кВ. Электрическая сеть характеризовалась значительной разветвленностью и наличием промежуточных распределительных пунктов 10 кВ, к которым подключены электродвигатели. Низковольтные нагрузки питались от цеховых подстанций 10/0,4 кВ. В качестве установки РГ использовалась ПТУ мощностью 3,125 МВ·А. При разработке модели СЭС были учтены активно-индуктивные нагрузки на напряжениях 10 кВ и 0,4 кВ.

Модель представленной СЭС для исследований режимов работы и влияния на них установки РГ выполнена в среде MATLAB с использованием пакетов имитационного моделирования Simulink и SimPowerSystems.

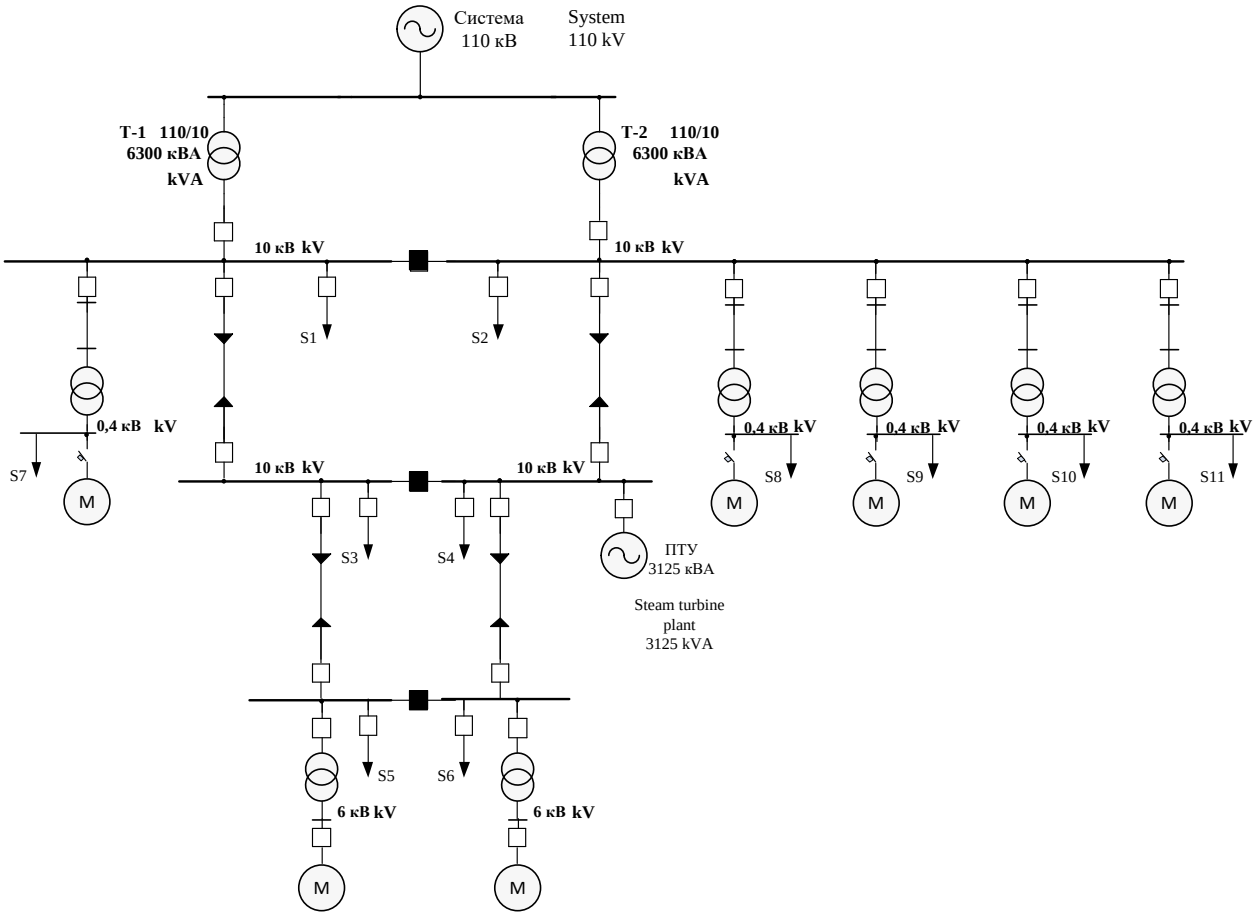


Рис. 1. Схема системы электроснабжения промышленного предприятия с установкой распределенной генерации
Fig. 1. Power supply system diagram of an industrial enterprise with a distributed generation plant

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для поиска рациональных коэффициентов настройки АРВ с учетом влияния АРС систему «турбина-генератор» необходимо представить двухсвязной, имеющей две выходных величины – частоту вращения ротора ω_g и напряжение генератора U_g. В этом случае регулятор имеет диагональную связь через канал регулирования АРВ по частоте (рис. 2). В структуру системы автоматического регулирования «турбина-генератор» входят элементы, описываемые соответствующими передаточными функциями: W_{ASR} – АРС; W_{T} – паровая турбина; W_{AVR}^{ω} – канал регулирования АРВ по частоте; W_{AVR}^{U} – канал регулирования АРВ по напряжению; W_R – общий регулятор, учитывающий взаимосвязь АРВ и АРС; W_E – возбудитель; W_G – генератор. На рис. 2 также обозначено: ω_z = 1 о.е. – заданное значение частоты вращения ротора; U_{gz} =1 о.е. – заданное значение напряжения генератора; dω – отклонение частоты вращения ротора от заданного значения; dU_g – отклонение напряжения от заданного значения.

Для предлагаемой структуры модели в качестве АРС может использоваться пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор, а в качестве АРВ – микропроцессорный АРВ сильного действия, также реализующий ПИД закон. Описание алгоритма настройки АРВ с учетом влияния АРС генератора приведено в работах [14–16].

Координация настроек АРВ и АРС предполагает выполнение следующих этапов:

– идентификация модели турбоге-

нератора на основе экспериментальных данных с использованием вейвлет-преобразования для выделения шума регуляторов [16];

– оптимизация настроек АРВ с учетом влияния АРС с использованием генетического алгоритма [14, 16];

– оценка запаса устойчивости системы.

Предлагаемые алгоритмы идентификации и координации настроек регуляторов реализованы в специализированном программном комплексе (ПК), описание которого приведено в [17]. Далее при оптимизации настроек регуляторов генератора ПТУ использовался этот ПК.

Для идентификации модели ПТУ использовались шумы регуляторов, которые принудительно вводились в модель. В канал регулирования АРС вводился белый шум с нормальным распределением и предельным значением спектральной плотности мощности S_L = 0,00002 о.е. В канал регулирования АРВ вводился аналогичный белый шум с S_L = 0,002 о.е. На рис. 3 (в качестве примера) показан сигнал изменения частоты вращения ротора генератора ПТУ.

В результате идентификации модели ПТУ был получен характеристический полином системы и построены амплитудно-частотные характеристики прямых и перекрестных связей параметров модели турбогенератора (рис. 4). В результате процедуры оптимизации настроек АРВ и АРС генератора с использованием полученной модели ПТУ были определены коэффициенты усиления регуляторов. Окно с результатами работы ПК ARE&ARRF представлено на рис. 4.

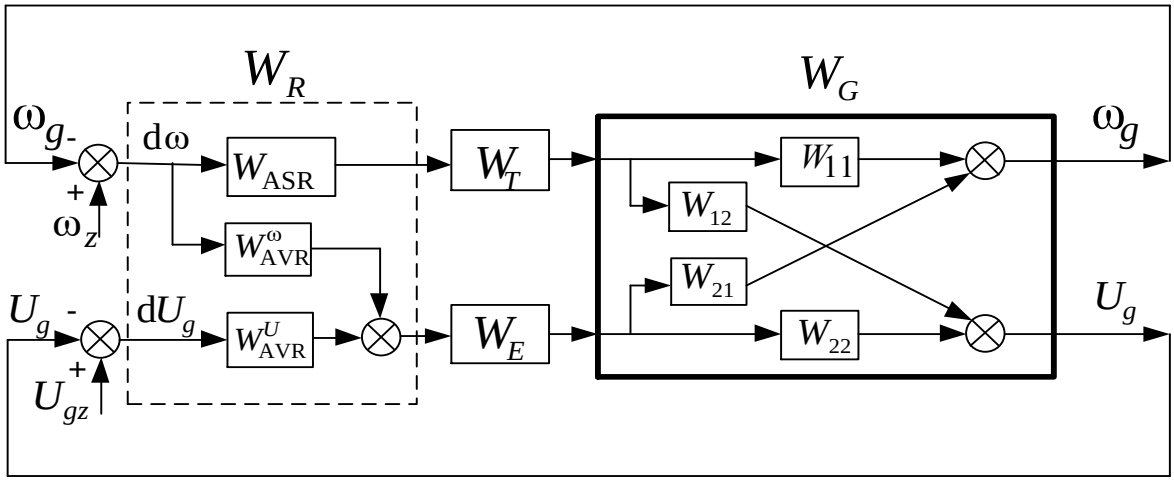


Рис. 2. Структура системы автоматического регулирования паротурбинной установки
Fig. 2. Structure of the steam turbine plant automatic control system

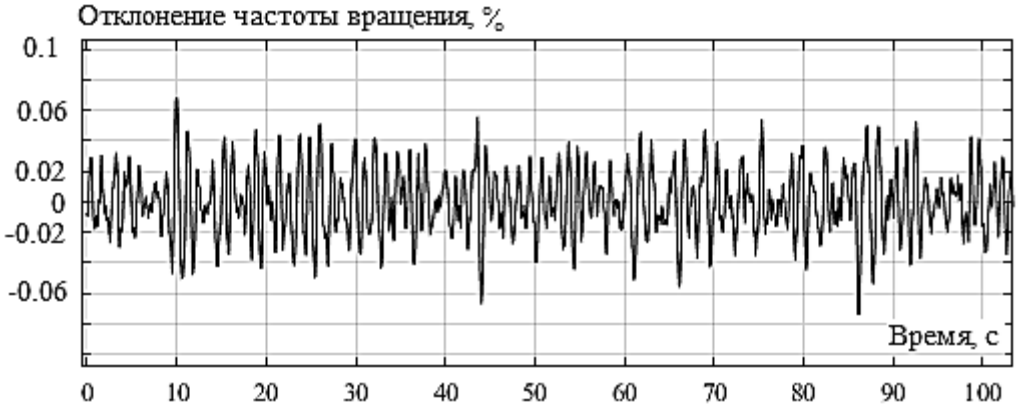


Рис. 3. Сигнал изменения частоты вращения ротора при идентификации
Fig. 3. Signal of rotor speed variation under identification

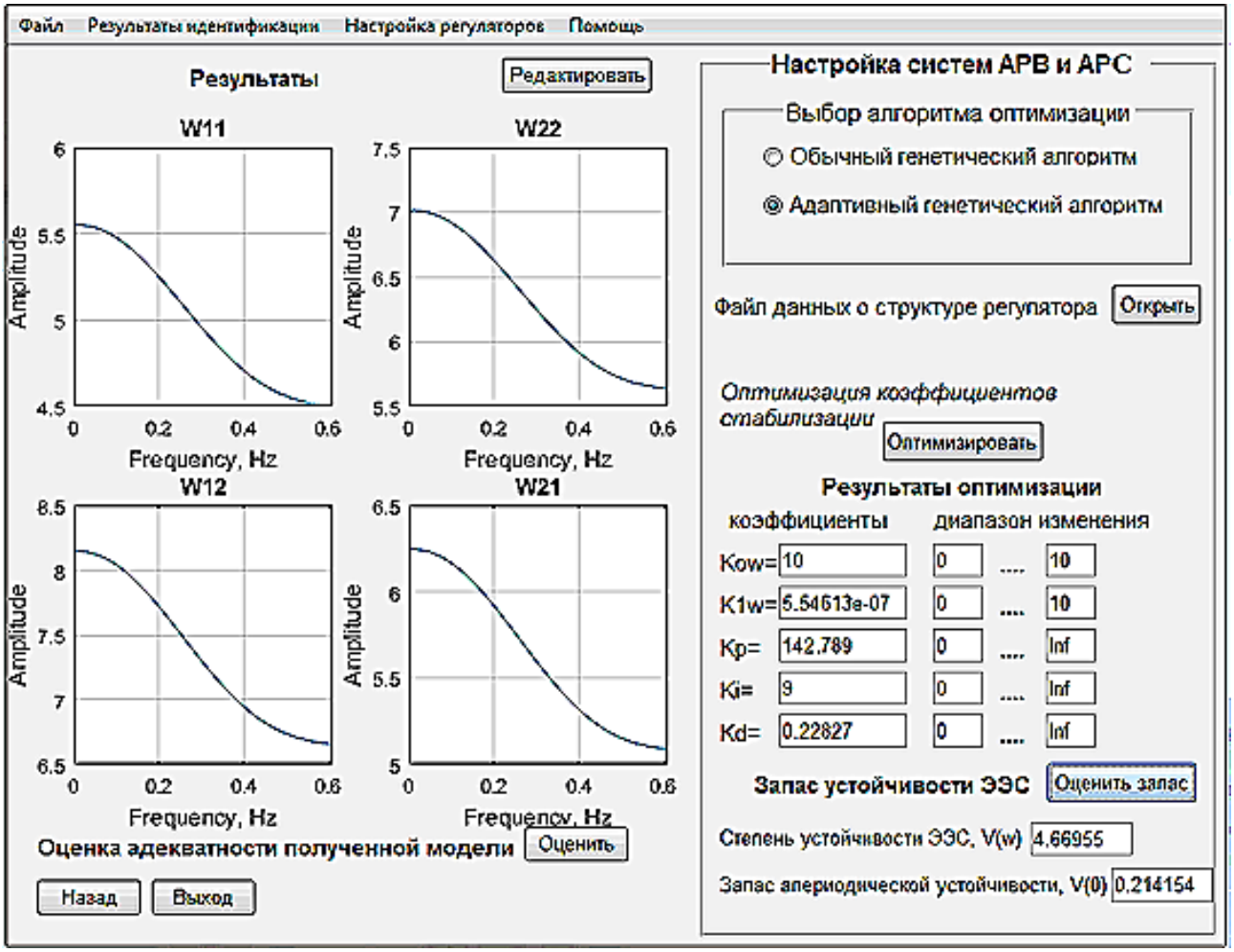


Рис. 4. Окно программного комплекса ARE&ARRF с результатами идентификации, настройки автоматических регуляторов возбуждения и автоматических регуляторов скорости
Fig. 4. ARE&ARRF software package window with the results of identification, setting of automatic excitation controllers and automatic speed controllers

Оценка запаса устойчивости по показателю скорости изменения фазы характеристического годографа системы (см. рис. 4) указывает на достаточную степень устойчивости для найденных коэффициентов настройки АРВ и АРС.

Для оценки эффективности работы ПТУ при скоординированной настройке АРВ и АРС моделировались следующие режимы:

– отключение промышленной сети от источника питания;

– самосинхронизация генератора ПТУ с сетью.

Результаты моделирования в виде зависимостей механической мощности на валу турбины, напряжений и частоты вращения от времени при различных настройках АРВ и АРС представлены на рис. 5–7.

Сравнение результатов моделирования работы ПТУ с различными настройками АРВ и АРС при отключении внешнего электроснабжения показывает, что координация настроек регуляторов позволяет снизить величины перерегулирования механической мощности на валу турбины и напряжения генератора. Также уменьшается длительность переходного процесса для напряжения. При самосинхронизации генератора ПТУ с промышленной сетью координированная настройка АРВ и АРС позволяет уменьшить величину перерегулирования частоты (рис. 7).



Рис. 5. Изменение механической мощности на валу турбины установки распределенной генерации при переходе в островной режим: 1 – нескоординированная настройка автоматических регуляторов возбуждения и автоматических регуляторов скорости (перерегулирование σ = 4,88%, время переходного процесса t_p = 3 с); 2 – координированная настройка автоматических регуляторов возбуждения и автоматических регуляторов скорости (σ = 2,44%, t_p = 3 с)
Fig. 5. Variation of mechanical power on the turbine shaft of the distributed generation plant when switching to the island mode: 1 – uncoordinated setting of automatic excitation controllers and automatic speed controllers (readjustment σ = 4.88%, transition process time is tp = 3 s); 2 – coordinated setting of automatic excitation controllers and automatic speed controllers (σ = 2.44%, tp = 3 s)

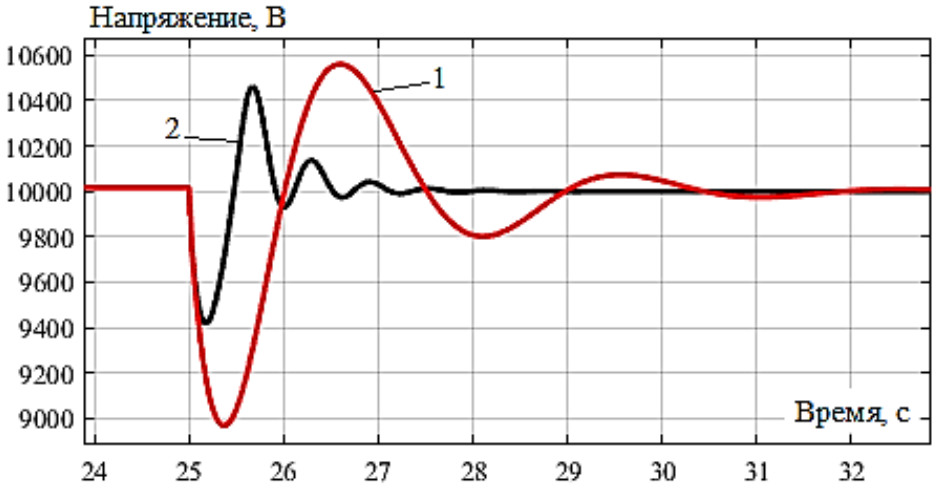


Рис. 6. Изменение действующего значения напряжения на шинах установки распределенной генерации при переходе в островной режим: 1 – нескоординированная настройка автоматических регуляторов возбуждения и автоматических регуляторов скорости (σ = 10%, t_p = 5 с); 2 – скоординированная настройка автоматических регуляторов возбуждения и автоматических регуляторов скорости (σ = 6%, t_p = 2 с)
Fig. 6. Variation of the effective voltage on the buses of the distributed generation plant when switching to the island mode: 1 – uncoordinated setting of automatic excitation controllers and automatic speed controllers (σ = 10%, tp = 5 s); 2 – coordinated setting of automatic excitation controllers and automatic speed controllers (σ = 6%, tp = 2 s)

Таким образом, координация настроек АРВ и АРС паротурбинной установки распределенной генерации позволяет улучшить качество регулирования механической мощности турбины, скорости ротора и напряжения генератора. Необходимо отметить, что совместное использование прогностических алгоритмов [18, 19] и координации настроек регуляторов позволяет получить дополнительный эффект при

управлении скоростью вращения ротора и напряжением синхронного генератора ПТУ в переходных режимах работы. В качестве примера на рис. 8 и 9 показаны графики, полученные в результате моделирования работы ПТУ с классическим и автопрогностическим АРС [20] при отключении внешнего электроснабжения.

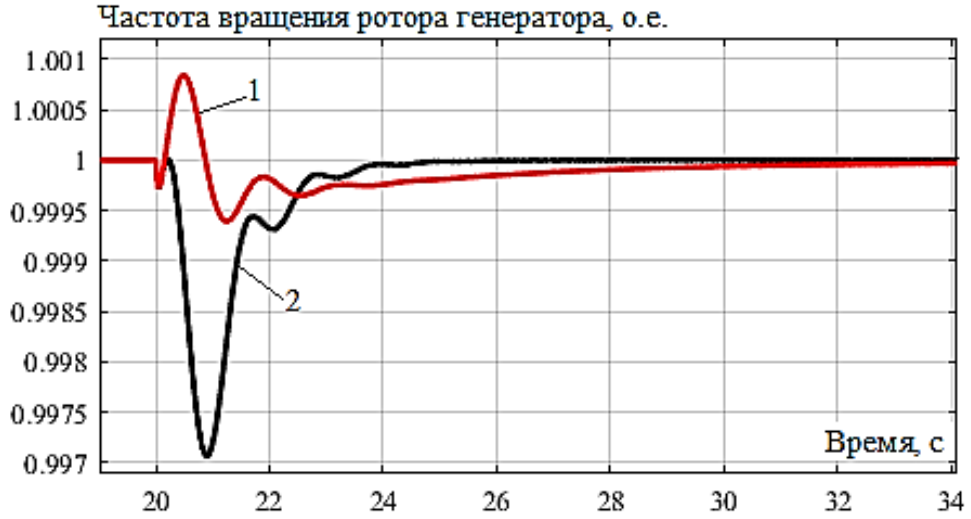


Рис. 7. Изменение частоты вращения ротора генератора паротурбинной установки при самосинхронизации с промышленной сетью: 1 – нескоординированная настройка автоматических регуляторов возбуждения и автоматических регуляторов скорости (σ = 0,3%, t_p = 4 с); 2 – скоординированная настройка автоматических регуляторов возбуждения и автоматических регуляторов скорости (σ = 0,06%, t_p = 4 с)
Fig. 7. Variation of the rotor speed of the steam turbine plant generator under self-synchronization with an industrial network: 1 – uncoordinated setting of automatic excitation controllers and automatic speed controllers (σ = 0.3%, t_p = 4 c); 2 – coordinated setting of automatic excitation controllers and automatic speed controllers (σ = 0.06%, t_p = 4 c)



Рис. 8. Изменение механической мощности на валу турбины паротурбинной установки: 1 – с использованием типового автоматического регулятора скорости (σ = 4,96 %, t_p = 3 с); 2 – с использованием автопрогностического автоматического регулятора скорости (σ = 0,97%, t_p = 2 с)
Fig. 8. Variation of mechanical power on the turbine shaft of the steam turbine plant: 1 – using a typical automatic speed controller (σ = 4.96%, t_p = 3 s); 2 – using an auto predictive automatic speed controller (σ = 0.97%, t_p = 2 s)



Рис. 9. Изменение частоты вращения ротора генератора паротурбинной установки: 1 – с использованием типового автоматического регулятора скорости (σ = 0,04%, t_p = 4 с); 2 – с использованием автопрогностического автоматического регулятора скорости (σ = 0,01%, t_p = 4 с)

Fig. 9. Variation of the rotor speed of the steam turbine plant generator: 1 – using a typical automatic speed controller (σ = 0.04%, t_p = 4 s); 2 – using an auto predictive automatic speed controller (σ = 0.01%, t_p = 4 c)

Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что использование автопрогностического АРС улучшает демпферные свойства регулятора и способствует более быстрому и плавному управлению мощностью турбины по сравнению с классическим АРС: перерегулирование снижается на 4%, а длительность переходного процесса уменьшается на треть.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что координация настроек регуляторов генератора ПТУ позволяет улучшить демпферные свойства системы, делая управление частотой и напряжением более быстрым и плавным.

Приведенные результаты показывают, что автопрогностический АРС позволяет улучшить демпферные свойства при управлении установкой РГ, подключаемой к статической и динамической нагрузке. Поэтому автопрогностический АРС может быть рекомендован для повышения эффективности регулирования частоты вращения ротора и управления регулирующими клапанами паровой турбины.

Таким образом, практическое использование предложенных алгоритмов настройки АРВ и АРС позволит повысить надежность работы установок РГ и качество процессов управления.

Библиографический список

1. Saleh M.S., Althaibani A., Esa Y., Mhandi Y., Mohamed A.A. Impact of clustering microgrids on their stability and resilience during blackouts // Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE): Proceedings on International Conference (Offenburg, 20–23 October 2015). Offenburg: IEEE, 2015. P. 195–200. https://doi.org/10.1109/ICSGCE.2015.7454295

2. Vassilyev S.N., Voropai N.I., Yadykin I.B., Morzhin Yu I., Shakarjan Yu G., Kucherov Yu N. Smart Grid Concept for Unified National Electrical Network of Russia // Innovative Smart Grid Technologies Europe: Proceedings of IEEE PES (Manchester, 5–7 December 2011). Manchester: IEEE, 2011. P. 1–5.

3. Buchholz B.M., Styczynski Z.A. Smart Grids – Fun-

damentals and Technologies in Electricity Networks. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45120-1
4. Nejad M.F., Saberian A.M., Hizam H., Radzi M.A.M., Ab Kadir M.Z.A. Application of smart power grid in developing countries // 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO) (Langkawi, 3-4 June 2013). Langkawi: IEEE, 2013. P. 427–431. https://doi.org/10.1109/PEOCO.2013.6564586
5. Suslov K.V., Solonina N.N., Stepanov V.S. A principle of power quality control in the intelligent distribution networks // International symposium on smart electric distribution systems and technologies EDST: Proceedings (Vienna, 07–11 September 2015). Vienna: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2015. P. 131–137. https://doi.org/10.1109/SEDST.2015.7315218
6. Jun Wang, Alex Q. Huang, Woongje Sung, Yu Liu, Baliga B.J. Smart Grid Technologies // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2009. Vol. 3. Issue 2. P. 16–23. https://doi.org/10.1109/MIE.2009.932583
7. Suslov K.V., Stepanov V.S., Solonina N.N. Smart grid: effect of high harmonics on electricity consumers in distribution networks // International Symposium on Electromagnetic Compatibility (Brugge, 02–06 September 2013). Brugge: IEEE, 2013. P. 841–845.
8. Xinwei Shen, Shouzhen Zhu, Jinghong Zheng, Yingduo Han, Qingsheng Li, Jing Nong, et al. Active distribution network expansion planning integrated with centralized and distributed Energy Storage System // Power & Energy Society General Meeting (Denver, 26–30 July 2015). Denver: IEEE, 2015. P. 1–5. https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286069
9. Martínez Ceseña E.A., Mancarella P. Techno-economic Optimisation and Flexible Planning Under Uncertainty of Smart Distribution Networks, Microgrids and District Energy Systems. Part 2 – Applications // IEEE PES Power & Energy Society. 2016. 1–68. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3065.4324
10. Barker Ph.P., De Mello R.W. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems. Part 1. Radial Distribution Systems // Power Engineering Society Summer Meeting (Seattle, 16–20 July 2000). Seattle: IEEE, 2000. P. 1645–1656. https://doi.org/10.1109/PESS.2000.868775
11. Olivares D.E., Mehrizi-Sani A., Etemadi A.H., Cañizares C.A., Iravani R., Kazerani M., et al. Trends in Microgrid Control // IEEE Transactions Smart Grid. 2014. Vol. 5. Issue 4. P. 1905–1919. https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514
12. Mahmoud M.S., AL-Sunni F.M. Control and Optimization of Distributed Generation Systems. Cham: Springer International Publishing, 2015. 578 p.
13. Ran Wang, Ping Wang, Gaoxi Xiao. Demand and Supply Management in Microgrids // Intelligent Microgrid Management and EV Control Under Uncertainties in Smart Grid. 2017. P. 21–44. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4250-8_3
14. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (Chelyabinsk, 19-20 May 2016). Chelyabinsk: IEEE, 2016. P. 1–6. https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911456
15. Kryukov A.V., Kargapol'cev S.K., Bulatov Yu.N., Skrypnik O.N., Kuznetsov B.F. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation // Far East Journal of Electronics and Communications. 2017. Vol. 17. No. 5. P. 1127–1140. https://doi.org/10.17654/EC017051127
16. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Применение вейвлет-преобразования и генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределенной генерации // Научный вестник НГТУ. 2016. Т. 63. № 2. С. 7–22.
17. Булатов Ю.Н., Игнатьев И.В. Программный комплекс для идентификации электроэнергетических систем и оптимизации коэффициентов стабилизации автоматических регуляторов возбуждения // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 4. С. 106–113.
18. Camacho E.F., Bordons C. Model Predictive Control: 2nd edition. London: Springer-Verlag, 2007. 405 p.
19. Пикина Г.А. Принцип управления по прогнозу и возможность настройки систем регулирования одним параметром // Новое в российской электроэнергетике. 2014. № 3. С. 5–13.
20. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguyen Van Huan. Automatic prognostic regulators of distributed generators // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (Vladivostok, 03–04 October 2018). Vladivostok: IEEE, 2018. Vol. 463. P. 1–4. https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602718

References

1. Saleh MS, Althaibani A, Esa Y, Mhandi Y, Mohamed AA. Impact of clustering microgrids on their stability and resilience during blackouts. Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE): Proceedings on International Conference. 20–23 October 2015, Offenburg. Offenburg: IEEE; 2015, p. 195–200. https://doi.org/10.1109/ICSGCE.2015.7454295
2. Vassilyev SN, Voropai NI, Yadykin IB, Morzhin Yu I, Shakarjan Yu G, Ku-cherov Yu N. Smart Grid Concept for Unified National Electrical Network of Russia. Innovative Smart Grid Technologies Europe: Proceedings of IEEE PES. 5–7 December 2011, Manchester. Manchester: IEEE; 2011, p. 1–5.
3. Buchholz BM, Styczynski ZA. *Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2014, 396 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45120-1
4. Nejad MF, Saberian AM, Hizam H, Radzi MAM, Ab Kadir MZA. Application of smart power grid in developing countries. 7th International Power Engineering and

Optimization Conference (PEOCO). 3-4 June 2013, Langkawi. Langkawi: IEEE; 2013, p. 427–431. https://doi.org/10.1109/PEOCO.2013.6564586
5. Suslov KV, Solonina NN, Stepanov VS. A principle of power quality control in the intelligent distribution networks. In: International symposium on smart electric distribution systems and technologies EDST: Proceedings. 07–11 September 2015, Vienna. Vienna: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc; 2015, p. 131–137. https://doi.org/10.1109/SEDST.2015.7315218
6. Jun Wang, Alex Q. Huang, Woongje Sung, Yu Liu, Baliga B.J. Smart Grid Technologies. IEEE Industrial Electronics Magazine. 2009;3(2)16–23. https://doi.org/10.1109/MIE.2009.932583
7. Suslov KV, Stepanov VS, Solonina NN. Smart grid: effect of high harmonics on electricity consumers in distribution networks. In: International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 02–06 September 2013, Brugge. Brugge: IEEE; 2013, p. 841–845.
8. Xinwei Shen, Shouzhen Zhu, Jinghong Zheng, Yingduo Han, Qingsheng Li, Jing Nong, et al. Active distribution network expansion planning integrated with centralized and distributed Energy Storage System. In: Power & Energy Society General Meeting. 26–30 July 2015, Denver. Denver: IEEE; 2015, p. 1–5. https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286069
9. Martínez Ceseña E.A., Mancarella P. Techno-economic Optimisation and Flexible Planning Under Uncertainty of Smart Distribution Networks, Microgrids and District Energy Systems. Part 2 – Applications. IEEE Power & Energy Society (PES). 2016:1–68. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3065.4324
10. Barker PhP, De Mello RW. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems. Part 1. Radial Distribution Systems. Power Engineering Society Summer Meeting. 16–20 July 2000, Seattle. Seattle: IEEE; 2000, p. 1645–1656. https://doi.org/10.1109/PESS.2000.868775
11. Olivares DE, Mehrizi-Sani A, Etemadi AH, Cañizares CA, Iravani R, Kazerani M, et al. Trends in Microgrid Control. IEEE Transactions Smart Grid. 2014;5(4):1905–1919.
https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514
12. Mahmoud MS, AL-Sunni FM. *Control and Optimization of Distributed Generation Systems*. Cham: Springer International Publishing; 2015, 578 p.
13. Ran Wang, Ping Wang, Gaoxi Xiao. Demand and Supply Management in Microgrids // Intelligent Microgrid Management and EV Control Under Uncertainties in Smart Grid. 2017:21–44. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4250-8_3
14. Bulatov YuN, Kryukov AV. Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm. In: 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 19-20 May 2016, Chelyabinsk. Chelyabinsk: IEEE; 2016, p. 1–6. https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911456
15. Kryukov AV, Kargapol'cev SK, Bulatov YuN, Skrypnik ON, Kuznetsov BF. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation. Far East Journal of Electronics and Communications. 2017;17(5):1127–1140.
https://doi.org/10.17654/EC017051127
16. Bulatov YuN, Kryukov AV. Application of the wavelet transform and genetic algorithms for tuning automatic regulators of distributed generators. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University. 2016;63(2):7–22. (In Russ.)
17. Bulatov JN, Ignat'ev IV. Program complex for identification of electropower systems and optimization of stabilization factors of automatic field regulators. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technology. 2010;4:106–113. (In Russ.)
18. Camacho EF, Bordons C. *Model Predictive Contro*l. London: Springer-Verlag; 2007, 405 p.
19. Pikina GA. Forecast management principle and possibility to configure regulation systems by a single parameter. *Novoe v rossijskoj elektroenergetike* = New in Russian Electrical Power-Engineering. 2014;3:5–13. (In Russ.)
20. Bulatov YuN, Kryukov AV, Nguyen Van Huan. Automatic prognostic regulators of distributed generators. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies.* 03–04 October 2018, Vladivostok. Vladivostok: IEEE; 2018;463:1–4. https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602718

Критерии авторства

Булатов Ю.Н. разработал алгоритмы координации настроек регуляторов и компьютерную модель системы электроснабжения с паротурбинной установкой распределенной генерации. Крюков А.В. разработал концепцию применения прогностических регуляторов для установок распределенной генерации. Нгуен Ван Хуан участвовал в разработке алгоритмов координации; выполнил имитационное моделирование режимов. Все авторы несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Bulatov Yu.N. has developed algorithms for coordinating controller settings and a computer model of the power supply system and a steam turbine installation of distributed generation. Kryukov A.V. has developed the concept of using predictive regulators for distributed generation installations. Nguyen van Huang participated in coordination algorithm development and performed mode simulation. All the authors bear the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Булатов Юрий Николаевич,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электроэнергетики
и электротехники,
Братский государственный университет,
665709, г. Братск, ул. Макаренко 40, Россия;
✉ e-mail: bulatovyura@yandex.ru

Крюков Андрей Васильевич,
доктор технических наук,
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;
e-mail: and_kryukov@mail.ru

Нгуен Ван Хуан,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: huanco.k7a@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuri N. Bulatov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Power Supply
and Electrical Engineering,
Bratsk State University,
40 Makarenko St., Bratsk 665709, Russia
✉ e-mail: bulatovyura@yandex.ru

Andrey V. Kryukov,
Dr. Sci. (Eng.),
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 Electric Energy,
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia
e-mail: and_kryukov@mail.ru

Nguyen Van Huan,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: huanco.k7a@gmail.com

Оригинальная статья / Original article
УДК 53.084.86
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-123-134

Анализ субсидирования тепловой энергии в Арктической зоне Республики Саха (Якутия)

© А.Е. Иванова, В.Е. Захаров, Т.Н. Петрова
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия

Резюме: Цель – анализ динамики субсидирования теплоснабжения Арктической зоны Республики Саха (Якутия). Для достижения цели использованы методы статистического, сравнительного и факторного анализов себестоимости производства теплоэнергии на основе статистических данных и сведений энергоснабжающих организаций Якутии. Были собраны и проанализированы сведения о выработке тепловой энергии, структуре стоимости топлива, используемого для производства тепла, в т.ч. стоимости закупки у поставщиков, доставки по магистральному, внутриулусному транспорту, а также о затратах на хранение. Были выделены районы с наиболее сложной схемой доставки топлива – Верхоянский, Усть-Янский, Момский улусы. Рассчитаны необходимые среднегодовые объемы субсидирования по всем Арктическим улусам с учетом площади и этажности жилого фонда с центральным отоплением. Проведен факторный анализ структуры себестоимости производимой теплоэнергии. Выявлена динамика изменения субсидируемой части тарифов теплоснабжения, на основе которого выполнен прогноз изменения тарифов на теплоэнергию до 2023 г. Оценены объемы субсидирования. Определено, что при наблюдаемом среднегодовом увеличении транспортных затрат топливоснабжения на 13% себестоимость производства теплоэнергии в Арктической зоне Якутии повышается на 6%. В результате ежегодно ожидаемый темп роста субсидий составит 4,4%, и к 2030 г. объем субсидирования теплоэнергии по сравнению с 2018 г. повысится в 1,5 раза. При изменении большинства факторов, влияющих на рост тарифов на тепло, охват субсидируемой части населения, а также сам объем могут увеличиться. Это обусловлено низким уровнем среднедушевого дохода населения на Севере и косвенно – ежегодным удорожанием конечной стоимости топлива.

Ключевые слова: Арктическая зона, Республика Саха (Якутия), труднодоступность, теплоснабжение, себестоимость теплоснабжения, доставка топлива

Информация о статье: Дата поступления 08 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 12 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Иванова А.Е., Захаров В.Е., Петрова Т.Н. Анализ субсидирования тепловой энергии в Арктической зоне Республики Саха (Якутия). *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 1. С. 123–134. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-123-134

Analysis of thermal energy subsidizing in the Sakha Republic (Yakutia) Arctic zone

Albina E. Ivanova, Vasily E. Zakharov, Tatiana N. Petrova
Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia

Abstract: The purpose is to analyze the heat supply subsidizing dynamics in the Arctic zone of the Sakha Republic (Yakutia). To achieve the purpose, the methods of statistical, comparative and factor analysis of heat production cost based on statistical data and information from energy supply companies in Yakutia are used. The authors have collected and analyzed the information on heat generation, structure of the cost of fuel used for heat production including the cost of purchase from suppliers, delivery via mainline and intra-settlement transport as well as storage costs. The regions with the most complicated fuel delivery scheme are identified: they are Verkhoyansky, Ust-Yansky and Momsky uluses. The necessary average annual amounts of subsidies for all Arctic uluses are calculated considering the area and number of floors of the housing stock with central heating. The factor analysis of the structure of the produced heat energy cost is carried out. Having revealed the variation dynamics of heat tariff subsidized part, the forecast of changes of heat supply tariffs is made for the period up to 2023. The subsidizing amount is estimated. It is determined that the observed average annual increase in fuel supply transport costs by 13% leads to 6% growth in the cost of heat production in the Arctic zone of Yakutia. As a result, the expected annual growth rate of subsidies will be 4.4%, and by 2030, the amount of heat energy subsidies will increase by 1.5 times compared to 2018. If most of the factors affecting the growth of heat tariffs change the coverage of the subsidized part of population, as well as the amount itself, may increase. This is due to the low per

capita income in the North and another indirect factor is the annual increase in the final cost of fuel.

Keywords: Arctic zone, the Sakha Republic (Yakutia), difficult-to-access, heat supply, heat prime cost, fuel delivery

Information about the article: Received November 08, 2019; accepted for publication December 12, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Ivanova AE, Zakharov VE, Petrova TN. Analysis of thermal energy subsidizing in the Sakha Republic (Yakutia) Arctic zone. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):123–134. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-123-134

1. ВВЕДЕНИЕ

К Арктической зоне Республики Саха (Якутия) относится 5 прибрежных улусов (районов), имеющих непосредственный выход к Северному Ледовитому океану: Аллаиховский, Анабарский, Булунский, Нижнеколымский, Усть-Янский, а также 8 улусов, имеющих большую схожесть характерных особенностей и климатических условий с этой зоной – Оленекский, Верхоянский, Эвено-Бытантайский, Жиганский, Абыйский, Момский, Среднеколымский, Верхнеколымский.

Одной из ключевых проблем Арктической зоны Республики Саха (Якутия) на протяжении долгих лет остается снижение затрат при доставке топливно-энергетических ресурсов для производства электроэнергии и теплоэнергии.

Проблемы в топливоснабжении Арктической зоны обусловлены такими же факторами, что и для всех труднодоступных территорий Севера России:

– сложной транспортной схемой доставки с несколькими перевалками на различные виды транспорта (морской, речной, автомобильный), что значительно увеличивает конечную стоимость топлива;

– необходимостью досрочного завоза топлива и материально-технических ресурсов, связанной с короткими сроками навигации и автозимников, в связи с чем понижаются качественные показатели энергоресурсов;

– необходимостью создания депонационных запасов топлива и материально-технических ресурсов, что ведет к замораживанию оборотных и других средств на срок до полутора лет [1–12].

2. ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ СТОИМОСТИ И РАСХОДА КОТЕЛЬНО-ПЕЧНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОЭНЕРГИИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Ежегодно в Арктическом улусе на производство электро-, теплоэнергии расходуется около 353 тыс. т у. т.[1], что составляет около 15% от общего потребления в республике. Наибольшее количество топлива расходуется на производство тепла (76%). В структуре используемого котельно-печного топлива большая половина приходится на уголь (59,7%), потребление нефти и газоконденсат находятся на уровне 26,1 и 9,3%, дизельное и древесное топливо составляют 4,0 и 0,8%, соответственно (рис. 1).

На производство тепла в Арктической зоне в 2018 г. было израсходовано около 168 тыс. т у. т. угля. Колымская и Индигирская группы улусов снабжаются углем Зырянского Разреза, расположенного в Арктической зоне (Верхнеколымский район). Для районов, расположенных на нижнем течении р. Лена и на бассейне р. Яна, уголь завозится из Джебарики-Хаинского разреза (Томпонский улус). Кроме того, в Момский улус завозится Аркагалинский уголь из Магаданской области.

Потребление сырой нефти в Арктических улусах имеет тенденцию снижения. В 2018 г. сырой нефтью были снабжены восемь улусов Арктической зоны в объеме более 73 тыс. т у. т. в год. По сравнению с 2015 г. потребление снизилось на 10%. Из общего объема около двух третей составила нефть Талаканского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) Ленского

[1]Здесь и далее указана оценка авторов на основе отчетных сведений ресурсоснабжающих организаций.

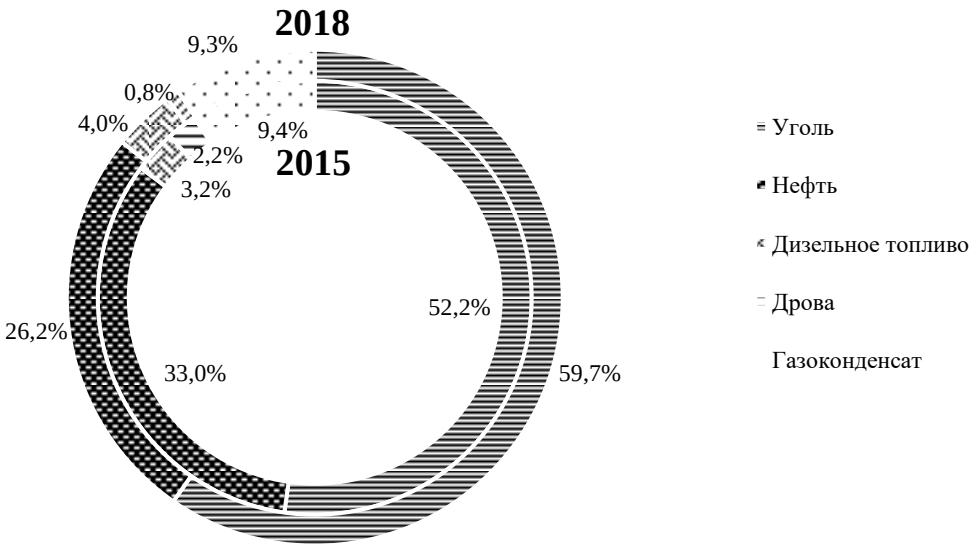


Рис. 1. Структура расхода котельно-печного топлива для производства теплоэнергии в Арктической зоне Республики Саха (Якутия) в 2018 г
Fig. 1. Boiler and furnace fuel consumption structure for heat production in the Arctic zone of the Sakha Republic (Yakutia) in 2018

улуса. Остальная часть была доставлена с Иреляхского НГКМ Мирнинского района. Наибольший объем нефти потребляется в Булунском, Нижнеколымском и Аллаиховском улусах.

Газоконденсат доставляется в пять улусов. Наибольшее количество потребляется в Анабарском и Булунском улусах, что связано с более рациональной логистикой доставки с мест производства. В структуре потребления газоконденсата в Арктической зоне доля этих районов составляет 42% и 39%, соответственно.

Потребление дровяного топлива все еще наблюдается в труднодоступных населенных пунктах Момского и Эвено-Бытантайского улусов около 2 тыс. т у. т. в год.

В 2018 г. в Арктических районах выработано около 5958 тыс. ГДж теплоэнергии, что составляет 10% от всего производства теплоэнергии в республике. При этом полезное потребление теплоэнергии уменьшается, а потери в теплосетях с каждым годом увеличиваются. Отчасти это обусловлено отнесением к потерям в теплосетях жилого фонда.

Рост стоимости поставки топлива происходит как за счет повышения закупочной цены в пунктах отпуска, так и за счет роста транспортных услуг по доставке топлива до пунктов назначения. В результате конечная цена ресурса в несколько раз превышает его закупочную цену (рис. 2).

Если средняя закупочная цена газоконденсата у поставщиков составляла 18,5 тыс. руб. за тонну, то с доставкой у конечного потребителя в Анабарском районе цена повысилась более чем в 2 раза. Конечная стоимость угля в Верхоянском районе превышает ее закупочную цену в 5-6 раз и составляет более 22 тыс. руб. за тонну [13].

Рост стоимости топливоснабжения приводит к увеличению себестоимости производства теплоэнергии, что в конечном счете отражается на приросте объемов субсидирования теплоснабжения. По сравнению с 2015 г., средний экономически обоснованный тариф (ЭОТ) увеличился на 36%, при этом объем субсидирования – на 37% за весь период.

Тарифы на тепловую энергию устанавливаются на поселенческом уровне и утверждаются Комитетом по ценовой политике Республики Саха (Якутия), регулируются государством и определяются на основе затрат производителей, целью кото-

рого является доступность всех категорий населения к услугам теплоснабжения. Таким образом, в среднем за период с 2015 по 2018 г. 90,8% ЭОТ на теплоэнергию субсидируется из регионального бюджета. Соответственно, часть ЭОТ, оплачиваемая населением, составляет 9,2%.

Основным поставщиком теплоэнергии является ГУП «ЖКХ РС(Я)» (государственное унитарное предприятие «Жилищно-коммунальное хозяйство Республики Саха (Якутия)), в ведении которого находится около половины котельных Арктической зоны. Максимальный тариф отмечен в Верхоянском и Эвено-Бытантайском улусах, где основным видом топлива выступают уголь и нефть, соответственно. Средний экономически обоснованный тариф в Арктических районах составляет 1706 руб. за 1 ГДж.[2]. Результаты расчета объемов субсидирования на тепловую энергию в динамике приведены в табл. 1 [14].

Как видно из таблицы, наиболее крупными субсидируемыми улусами Арктики являются Момский, Усть-Янский, и Верхоянский районы. Эти улусы характеризуются наибольшим расстоянием доставки котельно-печного топлива.

В Момском улусе для производства теплоэнергии потребляются все виды энергоресурсов. Как известно, основная часть топлива завозится из других районов республики и регионов страны. В среднем объем потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) составляет 18 тыс. т у. т. Таким образом, половина потребляемого угля поставляется с Аркагалинского угольного месторождения Магаданской области наземным путем, другая половина завозится с зырянского угольного разреза Верхнеколымского улуса Республики Саха (Якутия). Цена угля у поставщиков разнится почти в 1,8, а затраты на доставку – в 1,2 раза в пользу аркагалинского угля. Поэтому доставка местного угля до Момского улуса выходит дороже в 1,6 раза. Более 70% всей тепловой энергии в районе производится на дизельном топливе. В качестве основного котельно-печного топлива используется дизельное топливо, которое вырабатывает более 70% всей производимой тепловой энергии района. Доля дизельного топлива в стоимостной структуре ТЭР по стоимости закупки и доставки занимает 68,8%. Потребление газоконденсата достигает 17,8% потребления ТЭР для

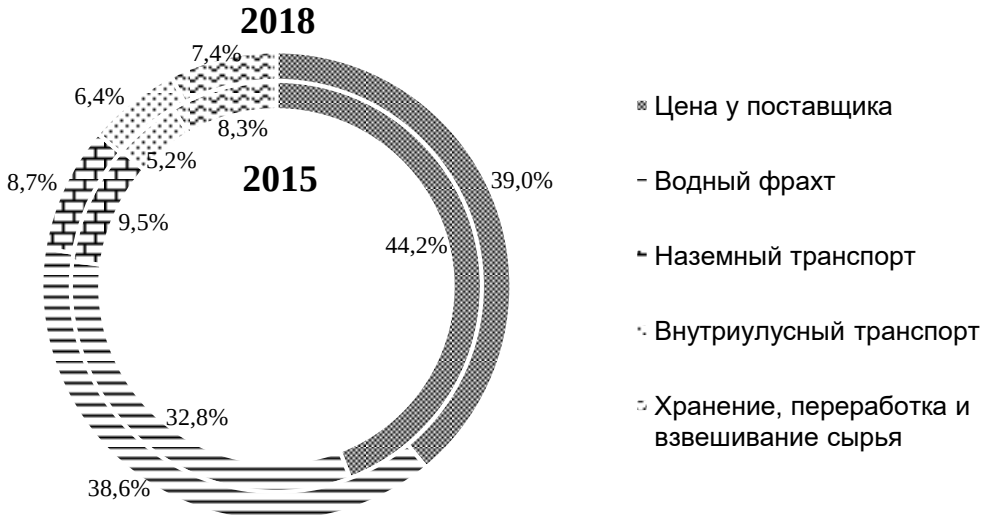


Рис. 2. Структура средней стоимости доставки топлива в Арктической зоне Республики Саха (Якутия) в 2015 и 2018 г
Fig. 2. Structure of the average cost of fuel transportation in the Arctic zone of the Sakha Republic (Yakutia) in 2015 and 2018

[2]Оценка авторов.

Таблица 1

Объемы субсидирования на теплоэнергию для населения в Арктической зоне Республики Саха (Якутия)

Table 1

Amount of heat subsidies to population in the Sakha Republic (Yakutia) Arctic zone

Районы	Годы			
	2015	2016	2017	2018
	сумма субсидирования на тепловую энергию, млн руб.			
Абыйский	271	314	335	390
Аллаиховский	234	241	281	275
Анабарский	219	283	282	313
Булунский	391	404	446	462
Верхнеколымский	177	171	164	180
Верхоянский	794	804	1021	1191
Жиганский	163	176	223	249
Момский	434	443	496	542
Нижнеколымский	286	303	309	318
Оленекский	274	275	314	373
Среднеколымский	339	389	368	401
Усть-Янский	327	647	697	714
Эвено-Бытантайский	185	206	235	245
Адресные субсидии малообеспеченным семьям по арктическим улусам	52	53	50	42
Итого	4147	4709	5223	5693

производства тепла. Затраты по закупке, доставке и хранению занимают 19,6%, из которых пятая часть расходуется на хранение. В Арктических улусах, в основном в Момском, используется дровяное топливо, здесь расходуется 97,8% потребляемых дров по всей Арктике.

Усть-Янский район тоже характеризуется сложной транспортной схемой доставки топлива «река-море-река». Уголь, завозимый с Джебарики-Хаинского разреза, занимает в структуре потребления около 75% от объема и столько же – в структуре затрат с доставкой. Большую часть затрат занимает доставка с месторождения до района – 68,2%, внутриулусная транспортировка – 12,9%, стоимость закупки составляет всего 18%. Вторым топливом, используемым для выработки тепла в котельных, является сырая нефть, которая завозится с Ирелляхского и Талаканского НГКМ. В конечной стоимости нефти транспортная составляющая занимает чуть более половины.

Одной из самых сложных схем доставки топлива для котельных имеет Верхоянский улус. В нормальном режиме уголь завозится до промежуточных складов водным путем, при срыве навигации недостаток угля завозится автозимниками. Навигационный период завоза грузов для потребителей, расположенных в бассейнах рек Яна и Индигирка, длится с конца мая до середины сентября, всего 3,5 мес. На самих указанных северных реках навигация открывается после первой декады июня. Во время навигационного периода возможны разные по длительности перерывы движения судов на различных участках, обусловленные в том числе такими природно-климатическими факторами как штормовая

обстановка, низкий уровень воды, неблагоприятная обстановка на барах рек (нагонные ветра, шторм). Непостоянство условий прохождения навигации обусловливает неравномерный поток грузов, что также осложняет его переработку в пунктах перегрузки. Возникновение очередей в таких пунктах – явление нередкое (рис. 3) [15]. Общая стоимость доставки угля в район с учетом хранения составляет 88,3% от всех расходов, направляемых для обеспечения топливом котельных. Расходы на поставляемое в качестве резервного дизельного топлива составляют менее 1%.

В ходе анализа структуры экономически обоснованного тарифа (ЭОТ) на теплоэнергию представленных районов выявлены льготная и субсидируемая доли за период с 2015 по 2018 г. Динамика показывает стабильный рост как льготной части тарифа, так и субсидируемой. Из-за высоких тарифов роста тарифов в Верхоянском районе субсидируемая часть ЭОТ растет быстрее и увеличивается в структуре, поэтому доля льготных тарифов для населения сокращается до 7,3% (рис. 4).

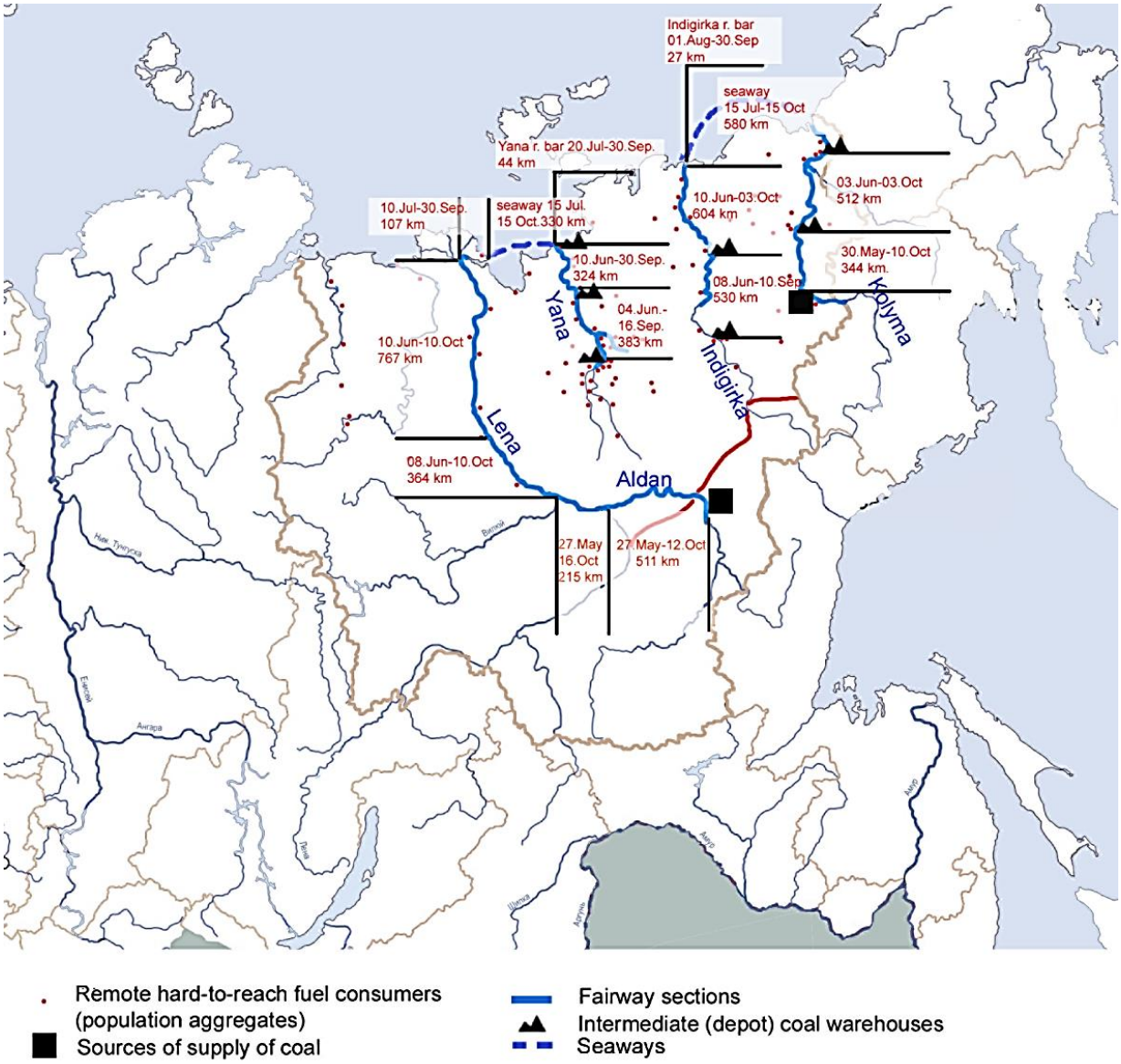


Рис. 3. Степень и функционировавшие периоды для 2016 г., водные пути для доставки угля удаленному труднодоступному потребителю Республики Саха (Якутия) [15, 16]
Fig. 3. Extent and operation periods (for 2016), waterways for coal delivery to remote hard-to-reach consumers of the Sakha Republic (Yakutia) [15, 16]

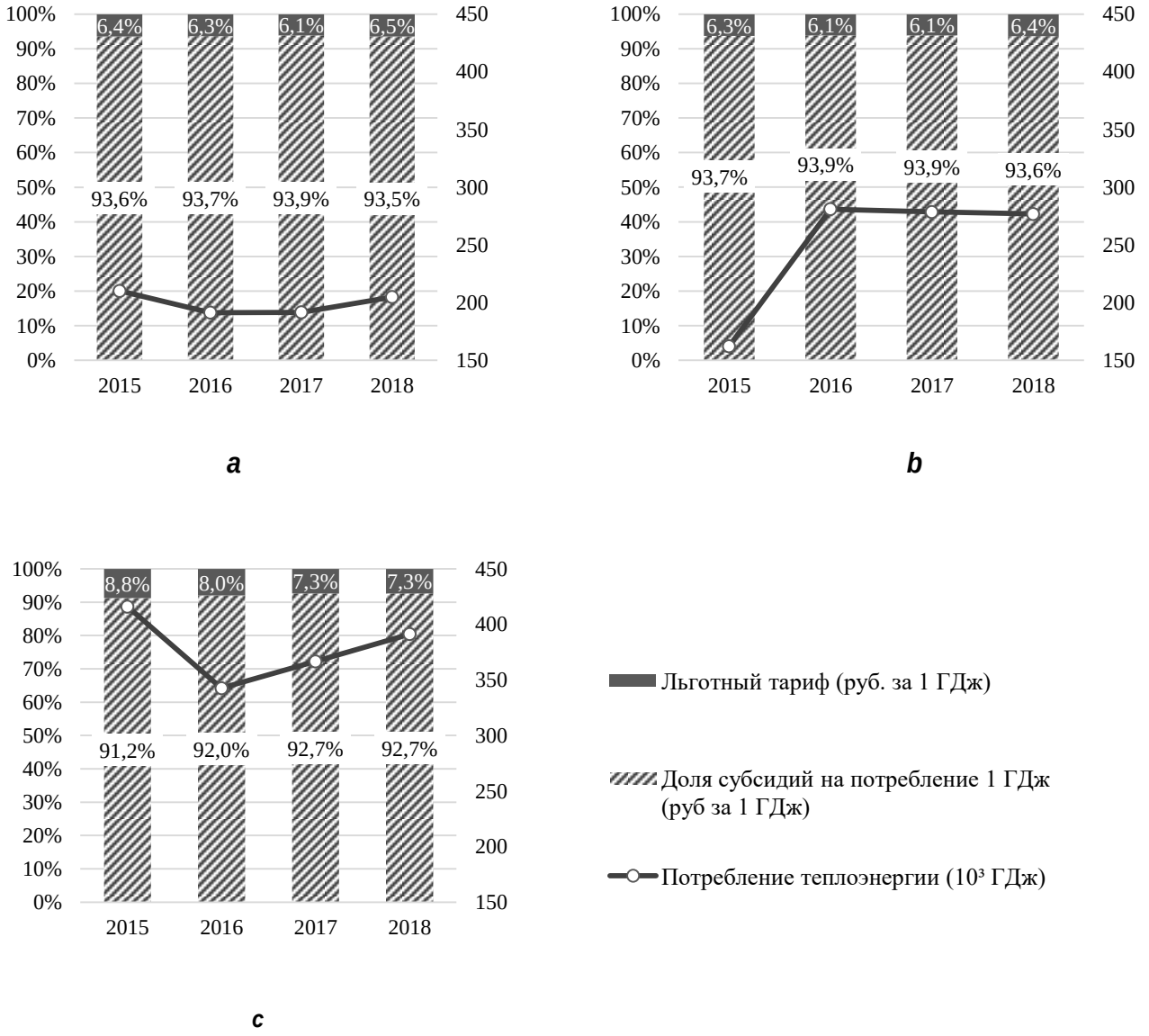


Рис. 4. Льготный тариф, субсидия и потребление теплоэнергии в Момском (a), Усть-Янском (b), Верхоянском (c) районах Арктической зоны Республики Саха (Якутия)
Fig. 4. Discount rate, subsidies and consumption of heat in Momsky (a), Ust-Yansky (b), Verkhoyansky (c) regions of the Sakha Republic (Yakutia) Arctic zone

Доходы населения определяют экономическую доступность услуг энергоснабжения в зависимости от объема потребления [17]. В децентрализованной зоне уровень среднедушевых и реально располагаемых доходов населения из года в год снижается. В целом за период наблюдалось как снижение численности населения, так и реально располагаемые доходы населения (рис. 5). Дальнейший ускоренный рост тарифов для населения может привести к неплатежеспособности, что приведет к задержке оплаты за потребленные ресурсы и увеличению дебиторской задолженности сбытовой компании.

Ежегодный темп роста объемов субсидирования совпадает с темпом роста экономически обоснованных тарифов. При этом прослеживается замедление темпов роста по обоим показателям (рис. 6).

Для факторного анализа в расчетах было применено изменение стоимости водного фрахта и объема грузов по формулам:

$$A = \frac{p_1 * Q_0 - p_0 * Q_0}{p_1 * Q_1 - p_0 * Q_0}; \quad (1)$$

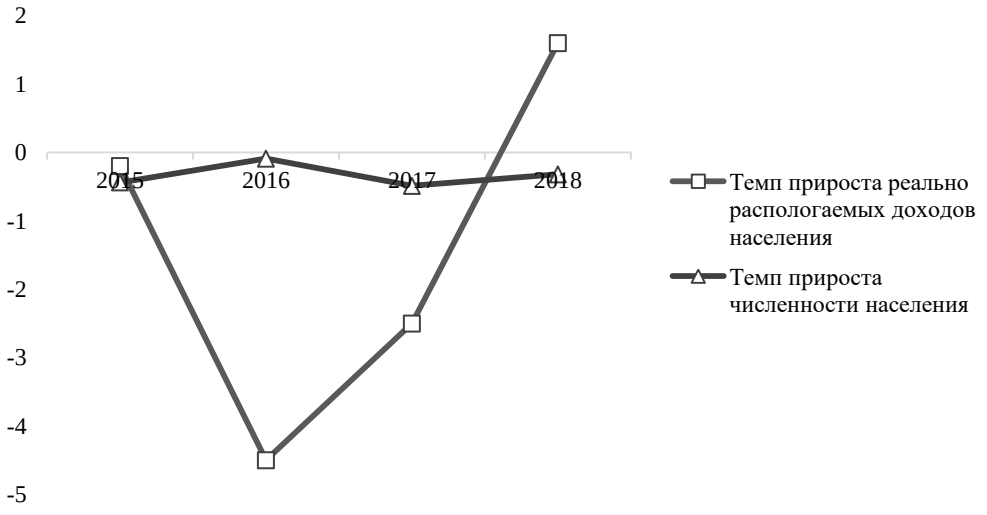


Рис. 5. Темпы прироста численности населения и реально располагаемых доходов населения в Арктической зоне Республики Саха (Якутия)
Fig. 5. Growth rate of population and their real disposable incomes of the Sakha Republic (Yakutia) Arctic zone

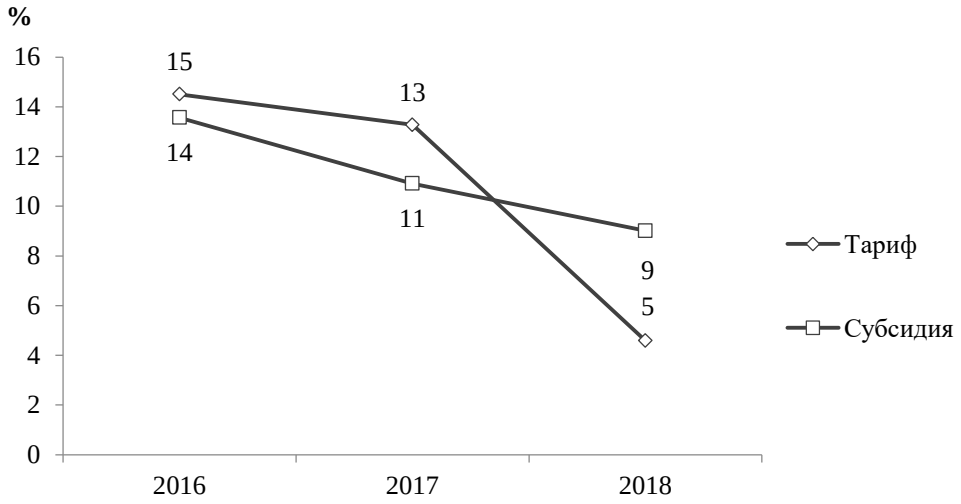


Рис. 6. Темп роста экономически обоснованных тарифов и субсидирования населения на потребление теплоэнергии Арктической зоны Республики Саха (Якутия)
Fig. 6. Growth rate of economically feasible tariffs and population subsidizing for heat consumption in the Sakha Republic (Yakutia) Arctic zone

$$B = \frac{p_1 * Q_1 - p_1 * Q_0}{p_1 * Q_1 - p_0 * Q_0}, \quad (2)$$

где p_0 – стоимость за предыдущий период; p_1 – стоимость за текущий период; Q_0 – объем груза за предыдущий период; Q_1 – объем груза за текущий период.

Как показывает факторный анализ стоимости сырья с учетом доставки и хранения, наибольшее влияние на себестоимость оказывает изменение тарифа водного фрахта, индекс влияния равен 0,7. Изменение объемов груза, поставляемого в Арктические районы, влияет на стоимость водного фрахта в обратную сторону: чем меньше груз, тем он дороже обходится, и наоборот, чем больше груз, тем уменьшается стоимость водного фрахта в расчете на единицу груза. Влияние изменения объема груза на стоимость наземного и внутриулусного транспорта прямопропорционально и составляет 0,8, а на стоимость хранения – 2 раза (табл. 2).

Таблица 2

Факторный анализ влияния изменения стоимости водного фрахта и объемов грузов на себестоимость производства тепловой энергии в Арктической зоне Республики Саха (Якутия)

Table 2

Factor analysis of the effect of changes in the cost of water freight and cargo volumes on the heat production cost in the Sakha Republic (Yakutia) Arctic zone

Факторы влияния	A (1)	B (2)
Влияние изменения стоимости водного фрахта на себестоимость тепловой энергии	0,7	–
Влияние изменения объема груза на стоимость водного фрахта	–	-5
Влияние изменения объема груза на стоимость наземного транспорта	–	
Влияние изменения объема груза на стоимость внутриулусного транспорта	–	0,8
Влияние изменения объема груза на стоимость хранения	–	2 р.

Таким образом, по Арктической зоне Республики Саха (Якутия) при росте закупочных цен на топливо у поставщика (в среднем) существенное увеличение затрат происходит по оплате услуг магистрального транспорта. Средний темп роста затрат на магистральный транспорт составляет 14% за период. В структуре транспортных услуг большая часть приходится на водный фрахт (63%). Увеличение тарифов грузоперевозки по водному транспорту существенно влияет на себестоимость выработки теплоэнергии. Если себестоимость перевозки, хранения топлива в общем ежегодно показывали рост в среднем на 13%, то перевозки водного транспорта в среднем повышались на 16%. При ежегодном увеличении транспортных затрат на 13% и неизменных значениях остальных факторов себестоимость производства теплоэнергии повысится на 6%. В результате ежегодный темп роста субсидий составит 4,4% и к 2023 г. объем субсидирования теплоэнергии по сравнению с 2018 г. повысится в 1,5 раза.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теплоснабжение в арктической зоне является наиболее затратной отраслью жилищно-коммунального хозяйства. Отсутствие местного производства, нацеленного на внешние рынки, обусловливает низкие доходы населения и, соответственно, низкую платежеспособность, в том числе за услуги жилищно-коммунального хозяйства. Льготный тариф на тепловую энергию для населения составляет менее 10%. Затраты на теплоснабжение практически полностью возложены на региональный бюджет. Существующая технологическая схема теплоснабжения практически исчерпала потенциал оптимизации, и при ее сохранении рост бюджетных затрат неизбежен. К 2023 г. необходимые затраты на теплоснабжение Арктической зоны Республики Саха (Якутия) повысятся в 1,5 раза и составят 8,4 млрд руб. в ценах 2018 г. Уход от данной тенденции возможен только при изменении технологии топливоснабжения. При сохранении в топливном балансе доминирования угля значительный эффект ожидается от ухода снабжения рядовым углем к сортовому и упаковке угля в мягкие контейнеры для наиболее удаленных потребителей [19,20]. Переход к автоматизации процессов теплоснабжения требует решения задачи обеспечения теплоснабжающих предприятий специалистами-инженерами контрольно-измерительных приборов и аппаратуры. А основным направлением снижения ежегодных затрат на теплоснабжение является качественное обновление жилого фонда и грамотная перепланировка поселений.

Библиографический список

1. Петров Н.А., Санеев Б.Г., Сафронов А.Ф. Энергетическая стратегия Республики Саха (Якутия) до 2030 г. Якутск: Медиа-холдинг «Якутия», 2010. 328 с.
2. Стенников В.А., Пеньковский А.В. Теплоснабжение потребителей в условиях рынка: современное состояние и тенденции развития // ЭКО. 2019. № 3. С. 8–20.
3. Стенников В.А., Петров Н.А., Иванова И.Ю., Добровольская Т.В., Павлов Н.В. Проблемы и направления развития теплоснабжения Республики Саха (Якутия) в среднесрочной перспективе // Энергетическая политика. 2018. № 1. С. 64–74.
4. Стенников В.А. Проблемы энергоснабжения и энергоэффективности малонаселенных территорий // Промышленная энергетика. 2017. № 2. С. 2–9.
5. Dobrovolskaya T., Stennikov V. Features of heat energy supply of the Republic of Sakha (Yakutia) northern regions // Regional Energy Policy of Asian Russia 2018: E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 77. P. 04002. [Электронный ресурс]. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/03/e3sconf_repar18_04002/e3sconf_repar18_04002.html (14.02.2019). https://doi.org/10.1051/e3sconf/ 20197704002
6. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф. Проблемы энергетики восточной зоны российской Арктики и возможные пути решения // Энергетическая политика. 2018. № 4. С. 80–87.
7. Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Ижбулдин А.К. Приоритеты развития локальной энергетики Арктической зоны на Востоке РФ // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление: сб. тр. Всерос. конф. (г. Иркутск, 01–03 сентября 2015 г.). Иркутск, 2015. С. 456–462.
8. Стенников В.А., Добровольская Т.В., Еделева О.А. Перспективы развития теплового хозяйства // Регион: экономика и социология. 2010. № S. С.139–154.
9. Стенников В.А. Энергосбережение в тепловом хозяйстве регионов России: проблемы и перспективы // Регион: экономика и социология. 2007. № 3. С. 210–227.
10. Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Петров Н.А. Системная оценка эффективности вариантов энерго-, топливоснабжения децентрализованных потребителей: методические подходы и результаты исследований // Прогнозирование развития мировой и российской энергетики: подходы, проблемы, решения: сб. науч. тр. VII Мелентьевских чтений (г. Москва, 01–04 апреля 2013 г.). М.: ИНЭИ РАН, 2013. С. 196–205.
11. Старостина А.Е., Павлов Н.В. Теплоснабжение в Республике Саха (Якутия): особенности и векторы развития // XVIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри, с международным участием, посвященной 25-летию со дня образования Технического института (филиала) СВФУ: материалы конф. (г. Нерюнгри, 30 марта–1 апреля 2017 г.). Нерюнгри: Изд-во СВФУ, 2017. Секция 1. С. 21-25.
12. Захаров В.Е., Иванова А.Е. Топливно-энергетический баланс северных административных районов Республики Саха (Якутия) и Чукотского автономного округа // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 7-8. С. 47–54. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-7-8-47-54
13. Захаров В.Е., Прохоров Д.В., Гаврилов В.Л. Потери энергетической ценности рядового угля при доставке до арктических потребителей Республики Саха (Якутия) // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. № 5–6. С. 13–22.
14. Цены // Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Республике Саха (Якутия). [Электронный ресурс]. URL: https://sakha.gks.ru/folder/32336 (14.02.2019).
15. Zakharov V. Features of the transport system of the Republic of Sakha (Yakutia) and the substantiation of the need for searching of ways to increase the reliability of coal supply // Regional Energy Policy of Asian Russia: E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 77. P. 04001. [Электронный ресурс]. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/03/e3sconf_repar18_04001/e3sconf_repar18_04001.html (14.02.2019). https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197704001
16. Zakharov V., Prokhorov D., Pavlov N. Russian Arctic region balance (Republic of Sakha (Yakutia)). Energy Systems Research 2019: E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 114. P. 02005. [Электронный ресурс]. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/40/e3sconf_esr2019_02005/e3sconf_esr2019_02005.html (17.02.2019). https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911402005
17. Дёмина О.В., Найден С.Н. Экономические последствия регулирования тарифов энергоснабжения для населения Хабаровского края // Региональные проблемы. 2018. Т. 21. № 4. С. 64–71. https://doi.org/10.31433/1605-220X-2018-21-4-64-71
18. Захаров В.Е., Иванова А.Е., Петрова Т.Н. Энергетика Арктической зоны Республики Саха (Якутия): текущая ситуация и перспективы развития // Экономика Востока России. 2019. № 1. С. 81–86.
19. Захаров В.Е. Захаров В.Е. Пути совершенствования методов учета объемов хранимого угля при снабжении труднодоступных потребителей // Евразийский симпозиум по проблемам надежности материалов и машин для регионов холодного климата: сб. тр. (г. Якутск, 3–7 июля 2018 г.). Якутск: Цумори Пресс, 2018. Т. 2. С. 260–269.
20. Захаров В.Е. Энергетическая безопасность как основная цель региональной энергетической стра-

тегии // Теплофизика и энергетика Арктических и субарктических территорий: матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Якутск, 24–27 июня 2019 г.). Якутск, 2019. С. 169–172

References

1. Petrov NA, Saneev BG, Safronov AF. Energy strategy of the Sakha Republic (Yakutia) for the period until 2030. Yakutsk: Media-holding “Yakutiya”; 2010, 328 p. (In Russ.)
2. Stennikov VA, Penkovskii AV. Heat supply of consumers under market conditions: current status and development trends. *EKO* = ECO. 2019;3:8–20. (In Russ.)
3. Stennikov VA, Petrov NA, Ivanova IYu, Dobrovol'skaya TV, Pavlov NV. Problems and areas of heat supply development in the Sakha republic (Yakutiya) in the medium term. *Energeticheskaya politika* = The Energy Policy. 2018;1:64–74. (In Russ.)
4. Stennikov VA. Problems of energy supply and energy efficiency in sparsely populated territories. *Promyshlennaya energetika* = Industrial Power Engineering. 2017;2:2–9. (In Russ.)
5. Dobrovolskaya T, Stennikov V. Features of heat energy supply of the Republic of Sakha (Yakutia) northern regions. In: *Regional Energy Policy of Asian Russia 2018: E3S Web of Conferences*. 2019;77: 04002. Available from: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/03/e3sconf_repar18_04002/e3sconf_repar18_04002.html [Accessed 14th February 2019]. (In Russ.) https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197704002
6. Saneev BG, Ivanova IYu, Tuguzova TF. Energy problems in the Eastern zone of Russian Arctic and possible solutions. *E'nergeticheskaya politika* = The Energy Policy. 2018;4:80–87. (In Russ.)
7. Ivanova IYu, Tuguzova TF, Izhbuldin AK. Local energy sector development priorities in the Arctic zone in the East of the Russian Federation. In: *Energetika Rossii v XXI veke. Innovacionnoe razvitie i upravlenie* = Russian Energy Sector in XXI century. Innovative development and management. 01–03 September 2015, Irkutsk. Irkutsk; 2015, p. 456–462. (In Russ.)
8. Stennikov VA, Dobrovol'skaya TV, Edeleva OA. Development prospects of thermal economy. *Region: ekonomika i sociologiya* = Region: Economics and Sociology. 2010;S:139–154. (In Russ.)
9. Stennikov VA. Energy saving in heat economy of Russian regions: problems and prospects. *Region: ekonomika i sociologiya* = Region: Economics and Sociology. 2007;3:210–227. (In Russ.)
10. Ivanova IYu, Tuguzova TF, Petrov NA. Systematic efficiency assessment of options for energy and fuel supply of decentralized consumers: methodological approaches and research results. In: *Prognozirovanie razvitiya mirovoj i rossijskoj energetiki: podhody, problemy, resheniya: sbornik nauchnyh trudov VII Melent'evskih chtenij* = Forecasting development of world and Russian energy sector: approaches, problems, solutions. 01–04 April 2013, Moscow, Moscow: The Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences. 2013:196–205. (In Russ.)
11. Starostina A.E., Pavlov N.V. Heat supply in the Republic of Sakha (Yakutia): features and development vectors In: *VIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov v g. Neryungri, s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennoy 25-letiyu so dnya obrazovaniya Tekhnicheskogo instituta (filiala) SVFU* =XVIII All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Graduate Students and Students in Neryungri with international participation dedicated to the 25th anniversary of the founding of the Technical Institute, branch of the North-Eastern Federal University: Proceedings of the conference (Neryungri, March 30 – April 1, 2017). Neryungri: NEFU Publishing House, 2017. Section 1. P. 21-25. (In Russ.)
12. Zakharov VE, Ivanov AE. Energy balance of Sakha Republic northern administrative districts and Chukchi Autonomous District. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki* = Power Engineering: Research, Equipment, Technology. 2015;(7-8):47–54. (In Russ.) https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-7-8-47-54
13. Zakharov VE, Prokhorov DV, Gavrilov VL. Raw coal energy losses in Republic of Sakha (Yakutia) Arctic consumers fuel supplying. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki* = Power Engineering: Research, Equipment, Technology. 2013;5-6:13–22. (In Russ.)
14. Prices. *Territorial authority of the Federal State Statistics Service for the Republic of Sakha (Yakutia).* Available from: https://sakha.gks.ru/folder/32336 [Accessed 14th February 2019]. (In Russ.)
15. Zakharov V. Features of the transport system of the Republic of Sakha (Yakutia) and the substantiation of the need for searching of ways to increase the reliability of coal supply. *Regional Energy Policy of Asian Russia: E3S Web of Conferences*. 2019;77:04001. Available from: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/03/e3sconf_repar18_04001/e3sconf_repar18_04001.html [Accessed 14th February 2019]. (In Russ.) https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197704001
16. Zakharov V, Prokhorov D, Pavlov N. Russian Arctic region balance (Republic of Sakha (Yakutia)). In: *Energy Systems Research 2019: E3S Web of Conferences.* 2019;114:02005. Available from: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/40/e3sconf_esr2019_02005/e3sconf_esr2019_02005.html [Accessed 17th February 2019]. (In Russ.) https://doi.org/10.1051/e3sconf/ 201911402005
17. Dyomina OV, Najden SN. Economic consequences of energy supply tariffs regulation for the Khabarovsk

Territory population. *Regional'nye problemy* = Regional problems. 2018;21(4):64–71. https://doi.org/10.31433/1605-220X-2018-21-4-64-71 (In Russ.)
18. Zakharov VE, Ivanova AE, Petrova TN. Energetics of the Republic Sakha (Yakutia) Arctic: current status and prospects of development. *Ekonomika Vostoka Rossii* = Economy of the East Russia. 2019;1:81–86. (In Russ.)
19. Zakharov VE. Directions for improving methods for calculating the volume of coal in supplying hard-to-reach consumers. In: *Evrazijskij simpozium po problemam nadezhnosti materialov i mashin dlya regionov holodnogo klimata: sbornik trudov* = Proceedings of the Eurasian Symposium on the problems of the reliability of materials and machines for cold climate regions. 3–7 July 2018, Yakutsk. Yakutsk: Tsumori Press; 2018, vol. 2, p. 260–269. (In Russ.)
20. Zakharov VE. Energy security as the main goal of the regional energy strategy. In: *Teplofizika i energetika Arkticheskih i subarkticheskih territorij: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Thermophysics and energy of the Arctic and subarctic territories: All-Russian scientific-practical conference with international participation. 24–27 June, 2019, Yakutsk. Yakutsk; 2019, p. 169–172. (In Russ.)

Критерии авторства

Иванова А.Е., Захаров В.Е., Петрова Т.Н. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Ivanova A.E., Zakharov V.E., Petrova T.N. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванова Альбина Егоровна,
ведущий инженер Отдела проблем энергетики,
Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН,
677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, д. 1, Россия;
✉ e-mail: aeiva@mail.ru

Захаров Василий Егорович,
научный сотрудник Отдела проблем энергетики,
Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН,
677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, д. 1, Россия;
e-mail: vasss@mail.ru

Петрова Татьяна Николаевна,
ведущий инженер Отдела проблем энергетики,
Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН,
677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, д. 1, Россия;
e-mail: tn_petrova_s@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Albina E. Ivanova,
Leading Engineer of the Energy Problems Department,
V.P. Larionov Institute of Physico-Technical Problems of the North SB RAS,
1 Oktyabrskaya St., Yakutsk 677980, Russia;
✉ e-mail: aeiva@mail.ru

Vasily E. Zakharov,
Researcher of the Energy Problems Department,
V.P. Larionov Institute of Physico-Technical Problems of the North SB RAS,
1 Oktyabrskaya St., Yakutsk 677980, Russia;
e-mail: vasss@mail.ru

Tatiana N. Petrova,
Leading Engineer of the Energy Problems Department,
V.P. Larionov Institute of Physico-Technical Problems of the North SB RAS,
1 Oktyabrskaya St., Yakutsk 677980, Russia;
e-mail: tn_petrova_s@mail.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.311
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-135-144

Идентификация фаз подключения интеллектуальных счетчиков в низковольтной распределительной сети

© Я.И. Кузькина*,, И.И. Голуб****
**ООО «Инженерный центр «Иркутскэнерго», г. Иркутск, Россия*
***Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Резюме: Цель – контроль и повышение эффективности и надежности работы низковольтных распределительных сетей как важнейших задач современной энергетики, поскольку на такие сети приходится значительная доля потерь и затрат при передаче электроэнергии. Распределительные сети следует моделировать как трехфазную, а информацию об энергопотреблении, потерях и потокораспределении определять для каждой фазы независимо. В таком случае кроме информации о параметрах схемы замещения фидеров необходимы данные об активных и реактивных нагрузках, представляемых в виде узловых мощностей или токов, а также знание распределения этих нагрузок по фазам. Необходимую информацию о нагрузках низковольтного фидера, на основе которой предлагается решать задачу идентификации фаз, можно получить от устанавливаемых в низковольтной сети интеллектуальных счетчиков, данные замеров которых регистрируются в отчетах автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии. Знание фазы подключения нагрузок необходимо для дальнейшего анализа топологии сети, параметров ветвей, расчета потокораспределения, потерь мощности, а при достаточном числе измерений и при условии их синхронизации – для оценивания состояния распределительных сетей. В работе проблема идентификации фаз решается для одного из фидеров низковольтной распределительной сети Иркутской области с использованием измерений мгновенных и средних значений модулей напряжений, получаемых из интеллектуальных счетчиков и регистрируемых в протоколах автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии. Результаты идентификации фаз подключения трехфазных и однофазных счетчиков получены на основе оценки взаимной корреляции напряжений в узле питания с известными фазами и в нагрузочных узлах сети в течение некоторого промежутка времени. Определение фазы подключения нагрузок производится по максимальным положительным значениям коэффициентов взаимной корреляции для ряда выборок измерений. Совпадение результатов по идентификации фаз для всех выборок измерений служит подтверждением достоверности полученного решения и доказывает эффективность использования корреляционного анализа.

Ключевые слова: низковольтная распределительная сеть, автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии, advanced metering infrastructure, интеллектуальные счетчики, идентификация фаз, корреляционный анализ

Благодарности: Исследование выполнено в рамках проекта III.17.4.2 фундаментальных исследований программы СО РАН № АААА-А17-117030310438-1. Авторы выражают благодарность за предоставленную для исследования информацию ОГУЭП «Облкоммунэнерго».

Информация о статье*:* Дата поступления 04 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 27 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Кузькина Я.И., Голуб И.И. Идентификация фаз подключения интеллектуальных счетчиков в низковольтной распределительной сети. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 1. С. 135–144. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-135-144

Identification of smart meter connection phases in low-voltage distribution network

Yana I. Kuzkina, Irina I. Golub
Irkutskenergo Engineering Center LLC, Irkutsk, Russia
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract**:** The purpose of the paper is to control and improve the efficiency and reliability of low-voltage distribution networks as these are the most important tasks of the modern energy sector, since such networks account for a significant share of losses and costs in electric energy transmission. Distribution networks should be modeled as three-phase net-

works, while information about power consumption, losses, and flow distribution should be determined independently for each phase. In this case, in addition to the information about the parameters of the feeder replacement scheme, the data on active and reactive loads represented as nodal capacities or currents, as well as knowledge of phase distribution of these loads are required. The necessary information on low-voltage feeder loads, which is proposed to be the basis for solving the problem of phase identification can be obtained from the smart meters installed in a low-voltage network. Measurement data of the smart meters are recorded in the reports of the automated information and measurement system for commercial electricity metering. Knowledge of the load connection phase is necessary for further analysis of network topology, branch parameters, calculation of flow distribution, power losses, and, if there are enough measurements and they are synchronized – for evaluating the state of distribution networks. This paper solves the problem of phase identification for one of the feeders of the Irkutsk region low-voltage distribution network using the measurements of instantaneous and average values of voltage modules, which are obtained from the smart meters and registered in the protocols of the automated information and measurement system of commercial electricity metering. The identification results of single- and three-phase meter connection phases are obtained based on the estimation of mutual correlation of voltages in the power supply node with the known phases, and in the network load nodes for a certain period of time. The load connection phase is determined by the maximum positive values of the cross-correlation coefficients for a number of measurement samples. Coincidence of the phase identification results for all measurement samples confirms the validity of the obtained solution and proves the effectiveness of the used correlation analysis.

Keywords: low-voltage distribution network, automated information and measuring system of commercial electricity metering, smart meter, phase identification, correlation analysis

Acknowledgements: The research is performed in the framework of the project III.17.4.2. of the program of fundamental researches SB RAS no. AAAA-A17-117030310438-1. The authors express gratitude to the regional state unitary energy enterprise Oblkommunenergo for the information provided for the study.

Information about the article: Received November 04, 2019; accepted for publication December 27, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Kuzkina YaI, Golub II. Identification of smart meter connection phases in low-voltage distribution network. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):135–144. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-135-144

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача перехода традиционных пассивных распределительных сетей (РС) к активным сетям – одна из важнейших для современной электроэнергетики. Главным фактором, способствующим такому переходу, является введение в РС источников возобновляемой генерации, приводящих к изменению поведения сети, в том числе к появлению в ней разнонаправленных перетоков и перенапряжений [1].

Управление активной РС невозможно без надежного оценивания состояния [2], которое для моделирования РС вместо однолинейной схемы замещения (как для магистральных электрических сетей) требует использования трехфазной схемы замещения [3, 4].

При определении топологии трехфазной сети особенно важной является информация о подключении нагрузок к фазам фидеров (от англ. «feeder»), требующая, как правило, проведения специального исследования. Такая информация необходима для моделирования каждой фазы РС, определения в ней состава нагрузочных узлов и задания в узлах измеренных значений мощностей и напряжений для дальнейшего расчета потокораспределения, потерь мощности и оценивания состояния.

В данной работе проблема идентификации фаз подключения нагрузок решается для реальной трехфазной четырехпроводной РС низкого напряжения на основе информации об измерениях средних значений модулей напряжений, полученной от интеллектуальных счетчиков и хранящейся в протоколах автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИСКУЭ).

2. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СЧЕТЧИКИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Интеллектуальные счетчики (ИС) − это счетчики высокого класса точности, устанавливаемые в нагрузочных узлах низ-

ковольтных фидеров, которые осуществляют измерения и запись данных об энергопотреблении с дискретностью в 15, 30 или 60 мин и передают эту информацию для дальнейшего анализа в центры сбора и обработки данных [4–9].

ИС оснащены низковольтные сети Европы [5]. В России (в декабре 2018 г.) принят Федеральный закон № 522-ФЗ, связанный с развитием систем «умного» учета электроэнергии и появлением электронных счетчиков нового поколения[1].

Некоторые ИС кроме учета потребляемой электроэнергии осуществляют измерения модулей напряжений, активных и реактивных мощностей [9]. Примерами таких одно- и трехфазных ИС являются приборы ряда отечественных компаний, такие как: счетчики «Эльстер Метроника», функционирующие в рамках технического решения «Альфа Смарт» [10, 11]; высокотехнологичные счетчики серии BINOM3, разработанные ЗАО «Алгоритм» [12]; а также счетчики научно-производственного объединения «МИР» [13].

В данной работе измерения мгновенных и средних значений напряжений в нагрузочных узлах осуществлялись счетчиками «МИР» для идентификации фаз подключения нагрузок.

За сбор и обработку измерительной информации от ИС отвечает современная измерительная инфраструктура, включающая комплекс контрольно-измерительной аппаратуры, коммуникационных сетей, электронно-вычислительных машин и программного обеспечения. За рубежом такой структурой является Advanced Metering Infrastructure (AMI) [14, 15], а в России – АИИСКУЭ [10, 11].

Для организации комплексных систем измерений со сложной иерархией в РС используются как проводные, так и беспроводные технологии [15].

Наибольшее распространение получили PLC-коммуникации, обеспечивающие передачу информации по силовым связям, являющиеся относительно недорогой и несложной технологией при наладке, но имеющей ограничения по пропускной способности, времени передачи данных измерений в центр их обработки и временному промежутку отклика на полученные из центра управляющие сигналы [16].

Примерами беспроводных коммуникаций являются ZigBee, облачные технологии и сотовая связь [17, 18], позволяющие объединить несколько ИС, обеспечить масштабируемость и самовосстановление системы измерений при ограничениях по дальности передачи и корректности передаваемых сигналов.

Для взаимного резервирования некоторые ИС поддерживают одновременно как проводные, так и беспроводные способы передачи данных [10–15].

3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФАЗ ПОДКЛЮЧЕНИЯ НАГРУЗОК РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Несмотря на возможности современных измерительных структур и счетчиков, информация о фазах низковольтных фидеров (рис. 1), в которых произведены измерения, отсутствует. Как правило, в отчетах АИИСКУЭ, содержащих результаты измерений ИС, трехфазные нагрузки маркируются как A, B, C, а все однофазные − как A. Отсутствие информации об истинных фазах подключения счетчиков не позволяет ни корректно определить топологию схемы сети, ни выполнить расчет потокораспределения.

Для определения фаз, к которым подключены нагрузки РС, могут использоваться различные методы [19–24]. Так, PLC-технологии позволяют обмениваться между ИС и специализированным оборудованием вторичной подстанции сигналами, по совпадению которых может быть сделан вывод о фазе присоединения счетчика [19].

В [20] показано, как использование специальных фазовых идентификаторов

[1]О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации: федер. закон № 522-ФЗ от 27.12.2018 г.

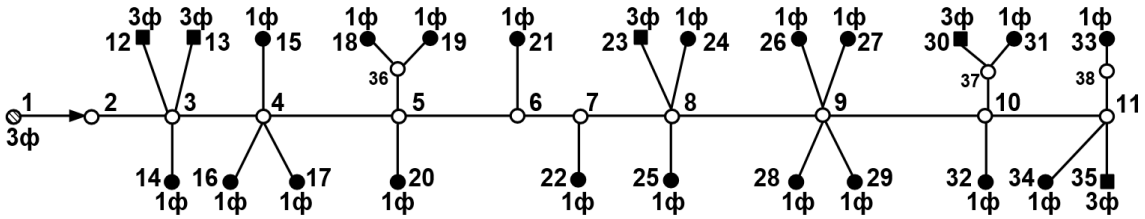


Рис. 1. Схема низковольтного фидера распределительной сети с указанием узлов установки одно- и трехфазных счетчиков
Fig. 1. Scheme of the distribution network low-voltage feeder with the indication of installation nodes of single and three-phase smart meters

GPS-связи позволяет синхронизировано сравнивать напряжение в узле с определяемой фазой, с напряжением в узле с известной опорной фазой.

Недостатком таких подходов является их большая стоимость и необходимость задействования персонала для проведения измерительного эксперимента, а также возможные ограничения доступа к счетчикам, расположенным внутри домов потребителей [21].

Менее затратным подходом для идентификации фаз, не требующим выезда бригады сетевой компании, дополнительного оборудования и сложного программного обеспечения является метод, основанный на оценке взаимной корреляции напряжений в двух узлах сети [22–24].

Методика корреляционного анализа заключается в одновременном измерении в течение длительного промежутка времени модулей напряжений в известных фазах узла питания $U_{1A}(t)$, $U_{1B}(t)$, $U_{1C}(t)$ и модуля напряжения в фазе x нагрузочного узла i, которую необходимо идентифицировать $Ui_X(t)$, где $t=1,..,n$, где n − число наблюдений.

Идентификация фазы x производится по максимальному значению коэффициентов взаимной корреляции между двумя векторами измерений модулей напряжений в узлах 1 и i – $U_{1A}(t)$ и $Ui_X(t)$, $U_{1B}(t)$ и $Ui_X(t)$, $U_{1C}(t)$ и $Ui_X(t)$, где измерения производятся в моменты времени t.

Если максимальный коэффициент корреляции связывает первую пару $U_{1A}(t)$ и $Ui_X(t)$, то x соответствует фазе А. Аналогичные выводы получены и для фаз В и С.

При предположении, что измерения напряжений в узлах 1 и i являются нормально распределенными случайными величинами, коэффициент взаимной корреляции для них может быть определен как

$$R_{U_{1A},Ui_X}=\frac{\sum_{t=1}^{n}\left(U_{1At}-\overline{U_{1A}}\right)\left(Ui_{Xt}-\overline{Ui_X}\right)}{\sqrt{\sum_{t=1}^{n}\left(U_{1At}-\overline{U_{1A}}\right)^2\sum_{t=1}^{n}\left(Ui_{Xt}-\overline{Ui_X}\right)^2}}.$$

Коэффициенты взаимной корреляции могут быть определены с использованием функции КОРРЕЛ в Excel или corrcoef в MATLAB, которая кроме определения взаимных коэффициентов корреляции R выдает информацию о вероятности их нахождения в 95% доверительном интервале. Если вероятность выхода коэффициента корреляции за границы доверительного интервала меньше чем 0,05, то корреляция является значимой.

В данной работе для идентификации фаз подключения нагрузок низковольтного фидера использовалась полученная из протоколов АИИСКУЭ информация о средних и мгновенных значениях напряжений в узле питания фидера с известными фазами о средних и мгновенных значениях напряжений в нагрузочных узлах, фазы которых неизвестны.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОВОЛЬТНОГО ФИДЕРА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Возможность использования коэффициентов взаимной корреляции для иден-

тификации фаз подключения ИС, установленных в нагрузочных узлах РС, исследовалась на примере фидера, питающего 24 дома одного из поселков в Иркутской области. Схема фидера приведена на рис. 1. В узлах 12, 13, 23, 30 и 35 с трехфазной нагрузкой установлены трехфазные счетчики МИР С-04, в узлах с однофазной нагрузкой – однофазные МИР С-05. В 1-м узле питания фидера установлен балансный трехфазный счетчик МИР С-07.

При решении задачи идентификации фаз использовались значения ежедневных мгновенных и среднечасовых суточных измерений модулей напряжений. Коэффициенты взаимной корреляции модулей напряжений определялись для трех вариантов выборок измерений, выполненных в 2018 г. Три выборки соответствуют измерениям ежесуточных мгновенных значений модулей напряжений: 1-я – в течение ноября-декабря; 2-я – для ноября; 3-я – для декабря. С 4-й по 6-ю выборки, соответственно, включили среднечасовые значения напряжений: за 11 февраля 2019 г.; 27528 измерений – за март 2019 г.; за трое суток августа.

Для каждого из шести вариантов выборок были сформированы матрицы с числом столбцов равным 37 в соответствии с суммарным числом измерений напряжений в узле питания и нагрузочных узлах различных фаз фидера, а число строк в матрицах определяется числом выборок − моментов времени, в которые проводились измерения. На рис. 2 показан порядок нумерации измерений в протоколах АИИСКУЭ для каждой выборки. Первые три измерения с известными фазами принадлежат счетчику в 1 узле питания фидера, а измерения с 4 по 37 соответствуют измерениям напряжений в нагрузочных узлах, для которых необходимо определить фазу, соответствующую одной из фаз 1-го узла. Например, измерения 4, 5 и 6 трехфазного счетчика для нагрузочного узла 12 отмечены как 12-1, 12-2 и 12-3, а измерение 10 – для однофазного счетчика в узле 14 как 14-1.

На рис. 3 для содержащих большие массивы данных 1-й и 5-й выборок, соответствующих измерениям мгновенных и средних значений модулей напряжений, приведены графики коэффициентов взаимной корреляции между измерениями модулей напряжений в известных фазах A, B, C узла питания и в нагрузочных узлах 12÷35.

Максимальные положительные значения коэффициентов взаимной корреляции обеих выборок (см. рис. 3) позволили определить совпадающие фазы, в которых произведено каждое с 4-го по 37-е измерение: например, что 14-е измерение однофазным счетчиком выполняется в фазе B, а измерения 35, 36 и 37 – трехфазного счетчика в фазах B, A и C 35-го узла.

На основе анализа диаграмм рис. 3 можно сделать вывод о том, что при использовании ежечасных средних значений модулей напряжений полученные максимальные положительные коэффициенты корреляции значительно больше, по сравнению с аналогичными показателями для мгновенных измерений напряжений.

Таким образом, средние значения напряжений позволяют более уверенно определить фазу, в которой производится измерение. Например, для нагрузочного

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1-A	1-B	1-C	12-1	12-2	12-3	13-1	13-2	13-3	14-1	15-1	16-1	17-1	18-1	19-1	20-1	21-1	22-1

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
23-1	23-2	23-3	24-1	25-1	26-1	27-1	28-1	29-1	30-1	30-2	30-3	31-1	32-1	33-1	34-1	35-1	35-2	35-3

Рис. 2. Нумерация измерений интеллектуальных счетчиков, установленных в узле питания и в нагрузочных узлах исследуемого фидера
Fig. 2. Measurement numbering of smart meters installed in the power node and load nodes of the studied feeder

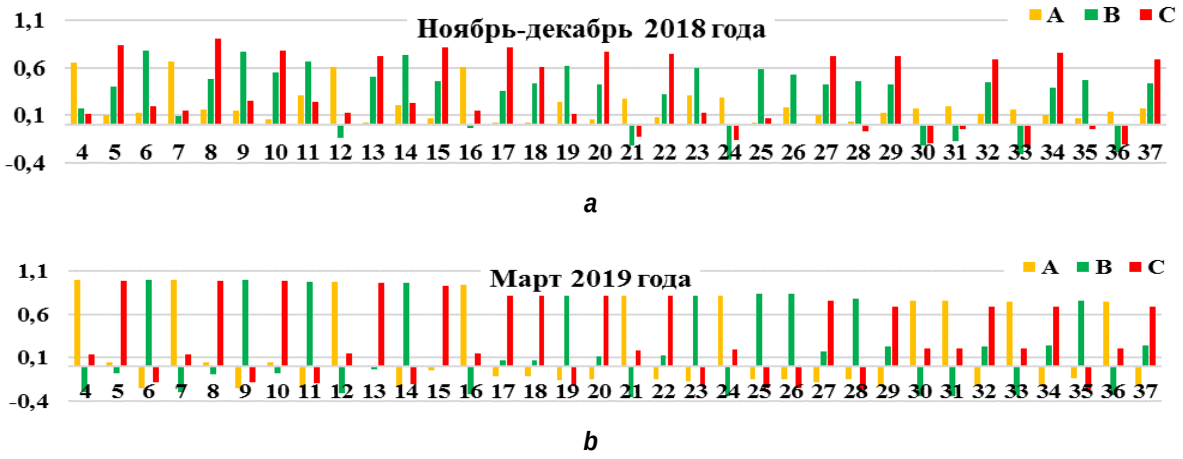


Рис. 3. Коэффициенты взаимной корреляции между измерениями в фазах A, B, C узла питания 1 и в 12÷35 нагрузочных узлах для первой и пятой выборок: a – за ноябрь-декабрь 2018 года; b – за март 2019 года
Fig. 3. Cross-correlation coefficients between measurements in phases A, B, C of the power node 1 and at load nodes 12÷35 for the first and fifth samples: a – for November-December 2018; b – for March 2019

узла 23 с трехфазной нагрузкой максимальные значения коэффициентов корреляции для мгновенных значений напряжений $K_{м}$ ниже чем коэффициенты корреляции для средних значений напряжений $K_{ср}$: для 19 измерения эти коэффициенты, идентифицирующие фазу B, соответственно, равны 0,624 и 0,870; для измерения 20 в фазе C – 0,765 и 0,811; для измерения 21 в фазе A – 0,279 и 0,853.

Диаграммы максимальных значений коэффициентов взаимной корреляции для всех шести выборок измерений модулей напряжений, приведенные на рис. 4, позволившие получить совпадающие результаты по идентификации фаз подключения нагрузок, дали возможность уверенно заключить, что в фазах A и B по 10 нагрузочных узлов, а фазе C − 14.

Сравнение максимальных коэффициентов взаимной корреляции с показанными на рис. 4 нижними границами уровней с сильной (0,7), средней (0,5) и умеренной (0,3) корреляцией также свидетельствует о том, что для выборок средних значений напряжений большая часть коэффициентов находится в зоне сильной корреляции, и все коэффициенты значимые.

Несмотря на большее доверие к замерам средних значений модулей напряжений при идентификации фаз подключения нагрузок (при отсутствии таких измерений), фиксирование мгновенных значений модулей напряжений также может использоваться для решения указанной проблемы.

Для первых трех вариантов выборок измерений мгновенных значений модулей напряжения фазы A практически все коэффициенты, находящиеся в зоне умеренной корреляции, получены для измерений ноября. Уровни значимости максимальных коэффициентов фазы A, полученных для измерений декабря и двух зимних месяцев для удаленных от источника питания узлов, превышают значение 0,1, что делает корреляцию незначимой. Для фазы B практически все максимальные коэффициенты для первых трех выборок лежат в зоне умеренной корреляции. Для фазы C максимальные коэффициенты, соответствующие составу измерений для декабря, заходят в зону слабой корреляции, но идентифицируемые ими фазы совпадают с фазами, определяемыми для измерений ноября и за два зимних месяца.

По мере удаления от узла питания для всех выборок отмечается снижение уровня взаимной корреляции, что подтверждает правильность задания последовательности узлов в фазных проводах разомкнутой сети.

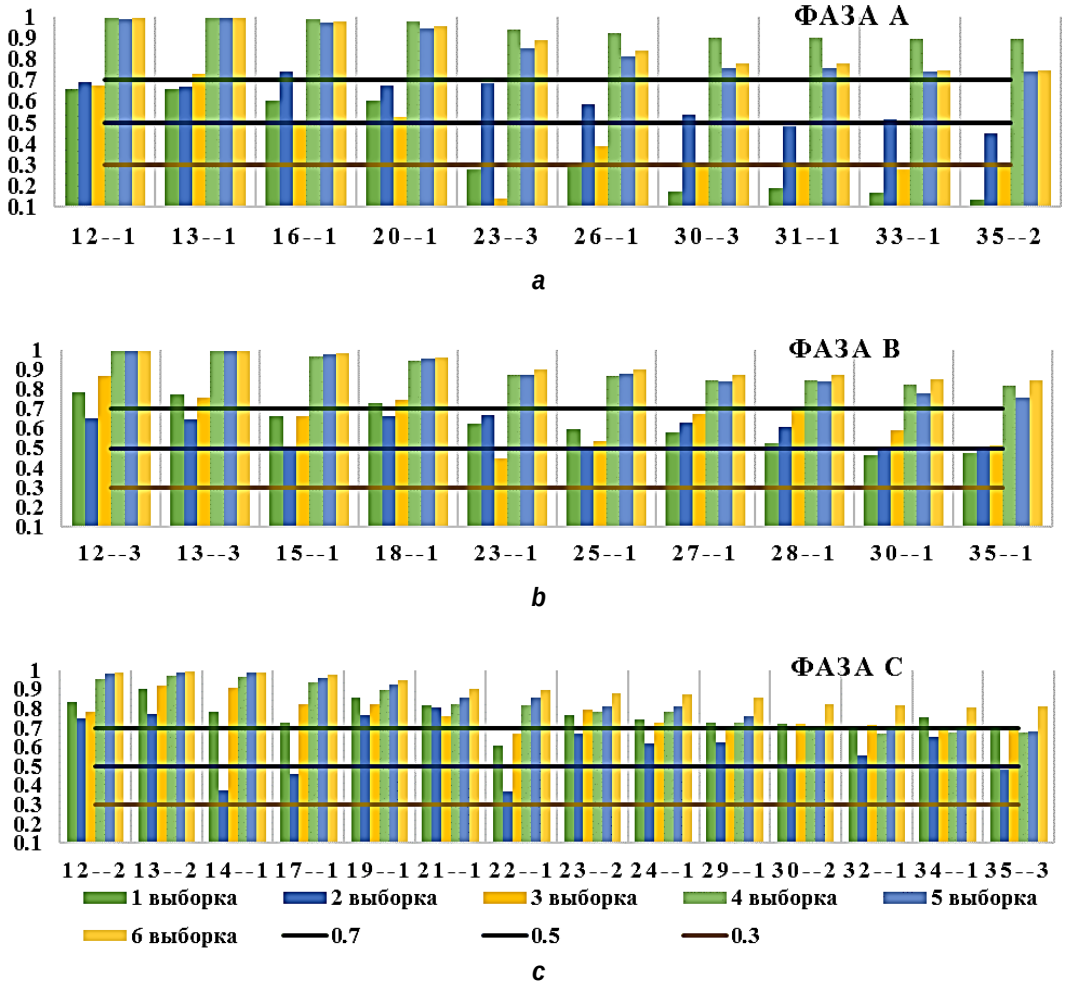


Рис. 4. Диаграммы максимальных положительных значений коэффициентов взаимной корреляции для шести выборок измерений напряжений: a – фаза A; b – фаза B; c – фаза C
Fig. 4. Diagrams of maximum positive values of cross-correlation coefficients for six samples of voltage measurements: a – phase A; b – phase B; c – phase C

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты для низковольтного фидера распределительной сети Иркутской области, оснащенного интеллектуальными счетчиками отечественного производства, иллюстрируют возможность использования данных измерений модулей напряжений такими одно- и трехфазными счетчиками для идентификации фаз их подключения.

Наиболее уверенные результаты по идентификации фаз подключения нагрузок получены при использовании измерений средних значений модулей напряжений.

Тем не менее, максимальные положительные коэффициенты корреляции, полученные при использовании ежесуточных мгновенных измерений модулей напряжений, отнесли эти измерения к тем же фазам, и при этом ни разу не возникло противоречивых результатов, что иллюстрирует эффективность использованного подхода.

Идентификация фаз подключения нагрузок необходима для моделирования каждой фазы низковольтного фидера, определения в фазах числа нагрузочных узлов и соответствующих этим узлам средних значений активной и реактивной мощности и напряжений, которые могут быть использованы для расчета потокораспределения, потерь мощности, а при достаточном числе измерений и для оценивания состояния.

Библиографический список

1. Olival P.C., Madureira A.G., Matos M. Advanced voltage control for smart microgrids using distributed energy resources // Electric power systems research. 2017. Vol. 146. P. 132–140. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.01.027
2. Primadianto A., Lu Ch-N. A Review on distribution system state estimation // IEEE Transactions on Power Systems. 2017. Vol. 32. Issue 5. P. 3875–3883. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2632156
3. Fei Ni, Phuong Hong Nguyen, Cobben J.F.G., Van den Brom H.E., Dongsheng Zhao. Three-phase state estimation in the medium-voltage network with aggregated smart meter data // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2018. Vol. 98. P. 463–473. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.033
4. Su Ma, Hong Zhang, Xiaomin Xing. Scalability for Smart Infrastructure System in Smart Grid: A Survey // Wirel Pers Commun. 2018. Vol. 99. Issue 1. P. 161–184. https://doi.org/10.1007/s11277-017-5045-y
5. Mak S.T. Smart Meters serving as synchro-sensors for smart distribution grid applications // Conference Power and Energy Society General Meeting (Detroit, 24–28 July 2011). Detroit: IEEE, 2011. P. 1–3. https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039070
6. Carro S.S., Llano A., Arzuaga A., Arzuaga T., Marron L., Zamalloa M. Smart meters enable synchrophasor applications in distribution grids // 44th International Conference on Large High Voltage Electric Systems. 2012. P. 1–8. [Электронный ресурс]. URL: https://cigreindia.org/CIGRE%20Lib/Cigre%20Pairis%202012/C6/C6_110_2012.pdf (02.02.2019).
7. Wellssow W.H., Waeresch D. Identification of topology faults by smart meter data in meshed low voltage grids // Power Systems Computation Conference (Wroclaw, 18–22 August 2014). Wroclaw: IEEE, 2014. P. 1–7. https://doi.org/10.1109/PSCC.2014.7038327
8. Rohrenbeck S. Construction, commissioning and use of a test bench for smart meter accuracy verification // Power and Energy Student Summit (IEEE PESS). 2015. P. 1–6. [Электронный ресурс]. URL: https://eldorado.tu-dortmund.de/handle/2003/33956 (30.06.2018). https://doi.org/10.17877/DE290R-7458
9. Bahmanyar A., Jamali S., Estebsari A., Pons E., Bompard E.F., Patti E., et al. Emerging smart meters in electrical distribution systems: opportunities and challenges // 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (Shiraz, 10–12 May 2016). Shiraz: IEEE, 2016. P. 1–6. https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2016.7585682
10. Журнал «Измерение.RU». 2013. № 16 [Электронный ресурс]. URL: https://www.izmerenie.ru/ru/number-15-6-12 (27.05.2019).
11. Журнал «Измерение.RU». 2013. № 17 [Электронный ресурс]. URL: https://www.izmerenie.ru/ru/izmerenie_ru-17 (27.05.2019).
12. Васильева О.А. Новый стандарт функциональности в промышленной автоматизации: интеллектуальные приборы BINOM3 // Технические и программные средства систем автоматизации. Решения для технического и коммерческого учета энергии. 2015. № 12. С. 1–8. [Электронный ресурс]. URL: http://www.binom3.ru/files/article3_ru.pdf (27.05.2019).
13. Журавлев В.В. Электрические сети в новом формате. Деловые встречи и обсуждения // Новости Электротехники. 2018. № 5–6. С. 20–29. [Электронный ресурс]. URL: http://www.news.elteh.ru/pics/113/04_Elseti_113-114.pdf (01.02.2019).
14. Mohassel R.R., Fung A., Mohammadi F., Raahemifar K. A survey on Advanced Metering Infrastructure and its application in Smart Grids // 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE) (Toronto, 4–7 May 2014). Toronto: IEEE, 2014. P. 1–8. https://doi.org/10.1109/CCECE.2014.6901102
15. By Trong Nghia Le, Wen-Long Chin, Dang Khoa Truong, Tran Hiep Nguyen. Advanced Metering Infrastructure Based on Smart Meters in Smart Grid // Smart Metering Technology and Services – Inspirations for Energy Utilities. 2016. P. 37–61. [Электронный ресурс]. URL: https://www.intechopen.com/books/smart-metering-technology-and-services-inspirations-for-energy-utilities/advanced-metering-infrastructure-based-on-smart-meters-in-smart-grid (02.02.2019). https://doi.org/10.5772/63631
16. Sendin A., Berganza I., Arzuaga A., Osorio X., Urrutia I., Angueira P. Enhanced Operation of Electricity Distribution Grids through Smart Metering PLC Network Monitoring, analysis and grid conditioning // Energies. 2013. Vol. 6. Issue 1. P. 539–556. https://doi.org/10.3390/en6010539
17. Shang-Wen Luan, Jen-Hao Teng, Shun-Yu Chan, Lain-Chyr Hwang. Development of a Smart Power Meter for AMI Based on ZigBee Communication // International Conference on Power Electronics and Drive Systems (Taipei, 2–5 November 2009). Taipei: IEEE, 2009. P. 661–665. https://doi.org/10.1109/PEDS.2009.5385726
18. Billewicz K. The use of Cloud Computing in AMI System Architecture // Modern Electric Power Systems (MEPS) (Wroclaw, 6–9 July 2015). Wroclaw: IEEE, 2015. P. 1–6. https://doi.org/10.1109/MEPS.2015.7477213
19. Patent no. 2010/0164473 A1 U.S. Meter phase identification / K.J. Caird. No. 12/345,702. Declared 01.07.2010; published 27.03.2012.
20. Chao-Shun Chen, Te-Tien Ku, Chia-Hung Lin. Design of phase identification system to support three-phase loading balance of distribution feeders // Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (Baltimore, 1–5 May 2011). Baltimore: IEEE, 2011. P. 191–198. https://doi.org/10.1109/ICPS.2011.5890874
21. Olivier F., Ernst D., Fonteneau R. Automatic phase identification of smart meter measurement data // CIRED - Open Access Proceedings Journal. 2017. Vol. 2017. Issue 1. P. 1579–1583. [Электронный ресурс].

URL:
https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8315775 (08.01.2019). https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.1143
22. Pezeshki H., Wolfs P. J. Consumer phase identification in a three phase unbalanced LV distribution network // Conference 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe) (Berlin, 14–17 October 2012). Berlin: IEEE, 2012. P. 1–7. https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2012.6465632
23. Wenpeng Luan, Joshua Peng, Mirjana Maras, Joyce Lo, Brian Harapnuk. Smart meter data analytics for distribution network connectivity verification // IEEE Trans Smart Grid. 2015. Vol. 6. Issue 4. P. 1964–1971. https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2421304
24. Watson J., Welch J., Neville W. Use of smart-meter data to determine distribution system topology // The Journal of Engineering. 2016. Vol. 2016. Issue 5. P. 94–101. https://doi.org/10.1049/joe.2016.0033

References

1. Olival PC, Madureira AG, Matos M. Advanced voltage control for smart microgrids using distributed energy resources. Electric power systems research. 2017;146:132–140. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.01.027
2. Primadianto A, Lu Ch-N. A Review on distribution system state estimation. IEEE Trans Power Syst. 2017;32(5):3875–3883.
https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2632156
3. Fei Ni, Phuong Hong Nguyen, Cobben JFG., Van den Brom HE, Dongsheng Zhao. Three-phase state estimation in the medium-voltage network with aggregated smart meter data. International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2018;98:463–473. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.033
4. Su Ma, Hong Zhang, Xiaomin Xing. Scalability for Smart Infrastructure System in Smart Grid: A Survey. Wirel Pers Commun. 2018;99(1):161–184. https://doi.org/10.1007/s11277-017-5045-y
5. Mak ST. Smart Meters serving as synchro-sensors for smart distribution grid applications. In: *Conference Power and Energy Society General Meeting.* 24–28 July 2011, Detroit. Detroit: IEEE; 2011, p. 1–3. https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039070
6. Carro SS, Llano A, Arzuaga A, Arzuaga T, Marron L, Zamalloa M. Smart meters enable synchrophasor applications in distribution grids. In: *44th International Conference on Large High Voltage Electric Systems.* 2012, p. 1–8. Available from: https://cigreindia.org/CIGRE%20Lib/Cigre%20Pairis%202012/C6/C6_110_2012.pdf [Accessed 2nd February 2019].
7. Wellssow WH, Waeresch D. Identification of topology faults by smart meter data in meshed low voltage grids. In: *Power Systems Computation Conference.* 18–22 August 2014, Wroclaw. Wroclaw: IEEE; 2014, p. 1–7. https://doi.org/10.1109/PSCC.2014.7038327
8. Rohrenbeck S. Construction, commissioning and use of a test bench for smart meter ac-curacy verification. Power and Energy Student Summit. 2015. P. 1–6. Available from: https://eldorado.tu-dortmund.de/handle/2003/33956 [Accessed 30th June 2018]. https://doi.org/10.17877/DE290R-7458
9. Bahmanyar A, Jamali S, Estebsari A, Pons E, Bompard EF, Patti E, et al. Emerging smart meters in electrical distribution systems: opportunities and challenges. In: *24th Iranian Conference on Electrical Engineering.* 10–12 May 2016, Shiraz. Shiraz: IEEE; 2016, p. 1–6. https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2016.7585682
10. Journal “Izmerenie.RU”. 2013:16. Available from: https://www.izmerenie.ru/ru/number-15-6-12 [Accessed 27th May 2019]. (In Russ.)
11. Journal “Izmerenie.RU”. 2013:17. Available from: https://www.izmerenie.ru/ru/izmerenie_ru-17 [Accessed 27th May 2019]. (In Russ.)
12. Vasilieva OA. A new standard of functionality for industrial automation: BINOM3 intelligent devices. *Tekhnicheskie i programmnye sredstva sistem avtomatizacii. Resheniya dlya tekhnicheskogo i kommercheskogo ucheta energii* = Engineering and software tools for automation systems. Solutions for technical and commercial energy metering. 2015;12:1–8. Available from: http://www.binom3.ru/files/article3_ru.pdf [Accessed 27th May 2019]. (In Russ.)
13. Zhuravlev VV. New format for electric grids. Meetings and discussions. *Novosti Elektrotekhniki* = Electrical Engineering News. 2018;5–6:20–29. Available from: http://www.news.elteh.ru/pics/113/04_Elseti_113-114.pdf [Accessed 1st February 2019]. (In Russ.)
14. Mohassel RR, Fung A, Mohammadi F, Raahemifar K. A survey on Advanced Metering Infrastructure and its application in Smart Grids. In: *27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE).* 4–7 May 2014, Toronto. Toronto: IEEE; 2014, p. 1–8. https://doi.org/10.1109/CCECE.2014.6901102
15. By Trong Nghia Le, Wen-Long Chin, Dang Khoa Truong, Tran Hiep Nguyen. Advanced Metering Infrastructure Based on Smart Meters in Smart Grid. Smart Metering Technology and Services – Inspirations for Energy Utilities. 2016:37–61. Available from: https://www.intechopen.com/books/smart-metering-technology-and-services-inspirations-for-energy-utilities/advanced-metering-infrastructure-based-on-smart-meters-in-smart-grid [Accessed 2nd February 2019]. https://doi.org/10.5772/63631
16. Sendin A, Berganza I, Arzuaga A, Osorio X, Urrutia I, Angueira P. Enhanced Operation of Electricity Distribution Grids through Smart Metering PLC Network Monitoring, analysis and grid conditioning. Energies. 2013;6(1):539–556. https://doi.org/10.3390/en6010539
17. Shang-Wen Luan, Jen-Hao Teng, Shun-Yu Chan, Lain-Chyr Hwang. Development of a Smart Power Meter for AMI Based on ZigBee Communication. In: *Inter-*

national Conference on Power Electronics and Drive Systems. 2–5 November 2009, Taipei. Taipei: IEEE; 2009, p. 661–665. https://doi.org/10.1109/PEDS.2009.5385726
18. Billewicz K. The use of Cloud Computing in AMI System Architecture. In: *Modern Electric Power Systems (MEPS).* 6–9 July 2015, Wroclaw. Wroclaw: IEEE; 2015, p. 1–6. https://doi.org/10.1109/MEPS.2015.7477213
19. Caird KJ. *Meter phase identification*. Patent U.S., no. 2010/0164473 A1; 2012.
20. Chao-Shun Chen, Te-Tien Ku, Chia-Hung Lin. Design of phase identification system to support three-phase loading balance of distribution feeders. In*: Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference.* 1–5 May 2011, Baltimore. Baltimore: IEEE; 2011, p. 191–198. https://doi.org/10.1109/ICPS.2011.5890874
21. Olivier F, Ernst D, Fonteneau R. Automatic phase identification of smart meter measurement data. CIRED – Open Access Proceedings Journal. 2017;2017(1):1579–1583. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8315775 [Accessed 8th January 2019]. https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.1143
22. Pezeshki H, Wolfs PJ. Consumer phase identification in a three phase unbalanced LV distribution network. In: *Conference 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe).* 14–17 October 2012, Berlin. Berlin: IEEE; 2012, p. 1–7. https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2012.6465632
23. Wenpeng Luan, Joshua Peng, Mirjana Maras, Joyce Lo, Brian Harapnuk. Smart meter data analytics for distribution network connectivity verification. IEEE Trans Smart Grid. 2015;6(4):1964–1971. https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2421304
24. Watson J, Welch J, Neville W. Use of smart-meter data to determine distribution system topology. The Journal of Engineering. 2016;2016(5):94–101. https://doi.org/10.1049/joe.2016.0033

Критерии авторства

Кузькина Я.И., Голуб И.И. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Kuzkina Ya.I., Golub I.I. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузькина Яна Игоревна,
инженер 2 категории сектора проектирования,
Служба релейной защиты и автоматики,
ООО «Инженерный центр «Иркутскэнерго»,
664043, г. Иркутск, бул. Рябикова, 67, Россия;
аспирант,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
e-mail: yaigk@yandex.ru

Голуб Ирина Ивановна,
доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия,
✉ e-mail: golub@isem.irk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yana I. Kuzkina,
Second Category Engineer of the Design sector,
Department of Relay Protection and Automation,
Irkutskenergo Engineering Center LLC,
67, Ryabikov Blvd., Irkutsk 664043, Russia;
Postgraduate student,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
e-mail: yaigk@yandex.ru

Irina I. Golub,
Dr.Sci. (Eng.), Professor,
Leading Researcher,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
✉ e-mail: golub@isem.irk.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.311.24
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-145-163

Методическое и программное обеспечение для оценки ветроэнергетического потенциала северо-востока России

© В.Г. Курбацкий*, В.А. Шакиров**
**Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*
***Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева, г. Иркутск, Россия*

Резюме: Цель данной статьи – представить анализ современного методического и программного обеспечения для оценки ветроэнергетического потенциала и рассмотреть особенности разработанной программы Wind-MCA. В статье представлен краткий обзор современного состояния и перспектив развития ветроэнергетики в мире и России. Изложены методические подходы и существующее программное обеспечение для оценки ветроэнергетического потенциала. Рассматриваются преимущества и недостатки источников исходной информации для оценки ветроэнергетического потенциала – данные спутниковых наблюдений, наземных метеостанций и климатических справочников. Приводятся характеристика и описание возможностей для оценки ветроэнергетического потенциала программы Wind-MCA, которая использует в качестве исходных данных статистически необработанные данные наземных метеостанций. Это позволяет обеспечить решение ряда задач, в которых требуется оценка ветроэнергетического потенциала с дифференциацией по направлениям ветра, часового ветроэнергетического потенциала во взаимосвязи с другими климатическими данными. Рассматривается применение Wind-MCA для решения такого вида задач. Представлена методика учета влияния рельефа местности на скорость ветра в зависимости от его направления, приведены результаты оценки ветроэнергетического потенциала для района с. Аян Хабаровского края. Изложен подход к оценке вариантов распределенного размещения сетевых ветроэлектростанций для уменьшения влияния краткосрочной изменчивости скорости ветра на колебания мощности станций. Приведены результаты моделирования выработки электроэнергии ветроэлектростанциями при их концентрированном и распределенном размещении в Кабанском районе Республики Бурятия. Представлен реализованный в Wind-MCA новый подход к учету влияния обледенения лопастей на выработку электроэнергии ветроэнергетическими установками. Приведены результаты расчета ветроэнергетического потенциала для различных районов востока России. Среднегодовые потери электроэнергии из-за обледенения варьируются в исследованных районах от 6,2 до 23,7%.

Ключевые слова: ветроэнергетический потенциал, ветроэлектростанции, программное обеспечение, данные метеостанций, климатические факторы, обледенение

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта государственного задания 17.6.1 (рег. № АААА-А17-117030310445-9) фундаментальных исследований СО РАН.

Информация о статье: Дата поступления 22 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 19 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Курбацкий В.Г., Шакиров В.А. Методическое и программное обеспечение для оценки ветроэнергетического потенциала северо-востока России. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2020. Т. 24. № 1. С. 145–163. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-145-163

Methodology and software for assessing the wind energy potential of the northeast of Russia

Viktor G. Kurbatsky, Vladislav A. Shakirov
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of this article is to present the analysis of modern methodology and software for assessing the wind energy potential and consider the features of the developed Wind-MCA program. The article provides a brief overview of the current state and development prospects of wind energy in the world and in Russia. Description is given to the methodical approaches and existing software for assessing the wind energy potential. Advantages and disadvantages of the sources of initial information (satellite observation data, meteorological station data, climate reference data) for assessing the wind energy potential are considered. Description is given to the Wind-MCA software features for

assessing the wind energy potential. The program uses statistically unprocessed data from meteorological stations. This enables the solution of a number of problems requiring estimation of the wind energy potential with differentiation in wind directions, as well as the hourly wind energy potential in combination with other climatic data. The application of Wind-MCA is discussed for solving these types of problems. The methods of accounting a terrain relief effect on the wind speed depending on its direction is presented. Assessment results of the wind energy potential for the area of the Ayan settlement, Khabarovsk Territory are given. An approach to assessing the options for the distributed location of network wind farms to reduce the effect of short-term variability of wind speed on station power fluctuations is described. The simulation results of electric energy generation by wind power plants under their concentrated and distributed siting in the Kabansky district of the Republic of Buryatia are given. A new Wind-MCA-implemented approach to accounting the effect of blade icing on power generation by wind power plants is presented. The results of the wind energy potential calculation for various regions of eastern Russia are provided. The average annual electricity losses in the studied areas due to icing vary from 6.2 to 23.7%.

Keywords: wind energy potential, wind power plants, software, meteorological station data, climatic factors, icing

Acknowledgements: The research has been carried out under the State Assignment Project 17.6.1 (reg. no. AAAA-A17-117030310445-9) of the Fundamental Research of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Information about the article: Received November 22, 2019; accepted for publication December 19, 2019; available online February 28, 2020.

For citation**:** Kurbatsky VG, Shakirov VA. Methodology and software for assessing the wind energy potential of the northeast of Russia. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):145–163. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-145-163

1. ВВЕДЕНИЕ

Ввод ветроэнергетических мощностей за последние пять лет характеризуется существенной динамикой, что связано с внедрением механизмов поддержки возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В перспективе до 2024 г. ожидается ввод порядка 3 ГВт сетевых ветроэлектростанций (ВЭС) в центральной и западной частях России [1]. Большую роль ветроэнергетика должна сыграть и в удаленных районах северо-востока страны, располагающих высоким ветроэнергетическим потенциалом (ВЭП) и имеющих значительные сложности с завозом топлива на электростанции малой мощности [2–4].

При реализации проектов строительства ВЭС большое значение имеет оценка ВЭП, которая в современной практике проводится с применением различных программных продуктов. Основой большинства зарубежных прикладных пакетов для определения характеристик ВЭП и прогноза показателей ветроэнергетических установок (ВЭУ) является программный комплекс WAsP [5]. Альтернативный подход к оценке ВЭП реализован в российском программном комплексе ВОСТОК [6]. Эти программные продукты используют осредненные за различный период климатические данные спутниковых наблюдений и наземных метеостанций, что не позволяет решать ряд задач, в которых требуется оценка ВЭП с часовой детализацией.

Для решения задач, в которых требуется оценка ВЭП с дифференциацией по направлениям ветра, часового ВЭП, часового ВЭП во взаимосвязи с другими климатическими данными, необходимо использовать статистически необработанные данные метеостанций. В статье приводится описание разработанной программы Wind-MCA, реализующей такие возможности. Приводятся методические подходы и результаты применения Wind-MCA для оценки ВЭП с часовой детализацией для восточных районов России.

2. ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ В МИРЕ И РОССИИ

Энергия ветра ввиду широкой распространенности и относительно высокой плотности энергетического потока является достаточно перспективным ресурсом среди ВИЭ для многих стран, в том числе и для России [7–9]. Ветроэнергетический тренд охватывает уже более 70 стран. Наибольшее развитие ветроэнергетика получила в Китае, США, Германии, Индии, Испании,

Франции и др. Начиная с 2009 г. ежегодно ветрогенерирующие мощности в мире увеличиваются на 40–50 ГВт. 2015 г. был беспрецедентным годом в развитии возобновляемой энергетики в целом и ветроэнергетики в частности – в эксплуатацию было введено 147 ГВт электрогенерирующих мощностей, причем почти 43% из них приходилось на долю ветроэнергетики. В период 2005–2018 гг. мощность ВЭС в мире возросла в 10 раз, достигнув 591 ГВт.

Более 44% мощности мировой ветроэнергетики сконцентрировано в Азии, на Европу приходится 33%, на Северную Америку – 23%. Страны Азии вышли на первое место в этой области энергетики, обогнав Европу, лидирующую до недавнего времени, благодаря, прежде всего, Китаю, взявшему в последнее десятилетие курс на возобновляемую энергетику. По состоянию на 2018 г. на долю Китая приходится 36% установленных ветрогенерирующих мощностей мира.

Согласно отчетам АО «Системный оператор Единой энергетической системы», суммарная мощность сетевых ВЭС России в 2018 г. составила 183,9 МВт. В табл. 1 представлены значения установленной мощности ВЭС в объединенных энергетических системах (ОЭС) и единой энергетической системе (ЕЭС) России за период с 2015 по 2018 гг. (табл. 1).

Ввод ветроэнергетических мощностей в России в последние годы связан с внедрением механизма поддержки ВИЭ, который действует на оптовом и розничном рынках электроэнергии и мощности с 2013 г. и рассчитан до 2024 г. Он состоит в проведении конкурсных отборов инвестиционных проектов по строительству генерирующих объектов, функционирующих на основе ВИЭ, и заключении в отношении отобранных проектов договоров на поставку мощности (ДПМ) ВИЭ. Основной критерий при конкурсном отборе проектов ВИЭ на оптовом рынке – минимизация капитальных вложений. В соответствии с ДПМ, потребители оптового рынка обязаны в течение 15 лет осуществлять регулируемую плату за мощность по льготным тарифам.

В июне 2019 г. закончился последний конкурсный отбор проектов ВИЭ, которые будут получать поддержку и должны быть введены в эксплуатацию до конца 2024 г. Суммарный объем отобранных проектов за период 2013–2019 гг. составил 5,4 ГВт, в том числе 3,38 ГВт (62,6%) в сфере ветроэнергетики [1] (табл. 2).

Все проекты строительства ВЭС, прошедшие конкурсный отбор, заявлены на территории европейской части России, в Краснодарском крае, Ростовской и Ульяновской областях, Республике Адыгее. Из северных регионов в проектах представлена только Мурманская область с суммарной мощностью сетевых ВЭС 351 МВт.

В то же время одним из потенциальных направлений развития ВИЭ-генерации являются изолированные и удаленные районы, характерные для северо-востока России [10] (рис. 1).

Таблица 1

Установленная мощность ветроэлектростанций в России, МВт

Table 1

Installed capacity of wind farms in Russia, MW

Энергосистема	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
ОЭС Центра	–	–	–	–
ОЭС Средней Волги	–	–	35	85
ОЭС Урала	2,2	2,2	1,7	1,6
ОЭС Северо-Запада	5,3	5,3	5,3	5,3
ОЭС Юга	3,4	3,4	92,4	92
ОЭС Сибири	–	–	–	–
ОЭС Востока	–	–	–	–
ЕЭС России	10,9	10,9	134,4	183,9

Таблица 2

Сведения о мощности ветроэлектростанций в отобранных проектах в рамках договоров на поставку мощности за период 2013–2019 гг., МВт

Table 2

Information about the wind farm capacity in selected projects under the power supply agreements for the period from 2013 to 2019, MW

Энергосистема	Субъект РФ	Годы							
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2013–2019
ОЭС Северо-Запада	Мурманская область	–	–	–	–	351	–	–	351
ОЭС Средней Волги	Республика Татарстан	–	–	–	–	100	–	–	100
	Ульяновская область	45	–	35	–	236	–	–	316
ОЭС Юга	Астраханская область	30	–	–	–	–	153	–	183
	Волгоградская область	–	–	–	–	–	77,4	–	77,4
	Краснодарский край	–	–	–	460	370	30	–	860
	Республика Адыгея	–	–	–	150	100	–	–	250
	Республика Калмыкия	–	51	–	–	–	175,1	–	226,1
	Ростовская область	–	–	–	–	390,1	113,6	–	503,7
	Ставропольский край	–	–	–	–	64	38,7	71,3	174
ОЭС Урала	Курганская область	–	–	–	–	40	–	–	40
	Оренбургская область	30	–	–	–	–	75,6	–	105,6
	Пермский край	–	–	–	–	–	189,9	–	189,9
ЕЭС России		105	51	35	610	1651,1	853,3	71,3	3376,7



Рис. 1. Зонирование территории России по степени централизации электроснабжения: 1 – централизованное электроснабжение; 2 – автономное электроснабжение; 3 – децентрализованное электроснабжение

Fig. 1. Zoning of the territory of Russia according to the power supply centralization degree: 1 – centralized power supply; 2 – stand-alone power supply; 3 – decentralized power supply

Это обусловлено рядом причин, среди которых слабая транспортная освоенность северных и арктических районов, сложная и многозвенная схема завоза топлива протяженностью несколько тысяч километров. По этой причине потери топлива составляют порядка 20% [2, 3]. Ограниченность сроков сезонного завоза топлива, зависимость от поставок обусловливают его удорожание, нерегулярное электроснабжение потребителей, которые обеспечиваются электроэнергией от автономных энергоисточников, в основном дизельных электростанций [4, 10–12]. В современных условиях цена дизельного топлива в северных районах превышает 60 тыс. руб./т, а транспортная составляющая в стоимости топлива – более 60%. Поэтому себестоимость производства электроэнергии достигает 30–40 руб./кВт·ч.

Более 65% валового ВЭП России сконцентрировано на территории Дальнего Востока [13]. Согласно оценкам [4], в период до 2050 г. суммарные вводы ВЭС в районах децентрализованного и неустойчивого электроснабжения на территории Дальнего Востока составят порядка 142–222 МВт по консервативному и целевому сценарию, соответственно.

В настоящее время установленная мощность ВЭС на северо-востоке России не превышает 8,5 МВт. В табл. 3 представлена информация о действующих в Дальневосточном федеральном округе ВЭС, в том числе в составе ветродизельных комплексов.

3. МЕТОДИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА

Ветроэнергетический поток является весьма нестабильным, имеет кубическую зависимость от скорости ветра. Это обусловливает высокую чувствительность производительности ВЭУ к месту их расположения.

Наиболее точную оценку выработки электроэнергии ВЭУ могут дать непосредственные измерения скорости ветра. Для создания и повышения точности расчетной модели измерения могут проводиться краткосрочно, например от 1 до 4 недель [14]. Долгосрочные исследования проводятся для непосредственного оценивания ветрового режима. Например, скорость и направление ветра могут регистрироваться ежечасно в течение от 6 до 24 мес. Более короткий период может быть достаточным, если нет значительных сезонных колебаний. Экспериментальные методики, основанные на долгосрочных измерениях, обеспечивают достаточную точность оценки ВЭП и мощности ВЭУ на расстоянии от ветроизмерительного комплекса до 2–5 км для равнинного рельефа и 1–2 км – для холмистой местности [5].

Таблица 3

Мощность и размещение ветроэлектростанций на Дальнем Востоке России

Table 3

Power and location of wind farms in the Russian Far East

Субъект РФ	Место размещения ветроэлектростанций	Мощность, кВт
Республика Саха (Якутия)	п. Тикси	900
	Быков мыс	40
Камчатский край	с. Никольское	550
	п. Усть-Камчатск	1175
	п. Октябрьский	3300
Сахалинская область	с. Новиково	450
	с. Головнино	450
Чукотский автономный округ	мыс Обсервации	2500
ИТОГО:		8465

Для экономии временных, трудовых и финансовых ресурсов оценка ВЭП в современной практике проводится с применением различных подходов. Предварительную ориентировочную оценку ВЭП в намеченном для размещения ВЭС пункте можно получить по данным метеостанций-аналогов[1], либо с помощью фоновых карт районирования территории по удельной мощности ветрового потока [15].

Достаточно полно перспективность участка местности можно оценить по комплексу благоприятствующих признаков, таких, как

1) малая длительность «энергетических» затиший;

2) продолжительный диапазон рабочих скоростей ВЭУ;

3) отсутствие ураганов;

4) малая изменчивость скорости ветра во времени.

Оценку всех указанных характеристик можно провести по параметрам распределения скорости ветра по градациям.

Исходную информацию для определения климатических характеристик ветроэнергоресурсов можно получить из следующих основных источников.

1. Научно-прикладной справочник по климату СССР, серия 3, многолетние данные. Для различных территорий СССР было издано 35 выпусков. Климатические характеристики месячного разрешения рассчитаны за период с 1881 по 1980 г. Экстремальные данные получены за период с 1881 по 1985 г., характеристики суточного разрешения – с 1936 по 1980 г.

2. Данные метеостанций, находящихся в открытом доступе в сети internet. Например, на сайте «Погода в 243 странах мира» [16] представлены данные измерений 8 раз в сутки за период с февраля 2005 г. по настоящее время.

3. Данные, полученные с помощью расчетных моделей с использованием спутниковых наблюдений. Например, ресурс NASA Power [17] предоставляет данные о скорости и направлении ветра за период с 1981 г. по настоящее время.

В табл. 4 представлена сравнительная характеристика источников информации для оценки ВЭП. Каждый из рассмотренных источников информации обладает преимуществами и недостатками, поэтому для повышения точности оценки ВЭП целесообразно использовать их в комбинации. Наиболее точная оценка ВЭП и возможной выработки электроэнергии ВЭС с учетом влияния рельефа местности, характеристик поверхности и вертикального профиля скорости может быть получена с применением программных продуктов.

Основой большинства зарубежных прикладных пакетов (WindPro, OpenWind, WindFarmer, Resoft, WindFarm и др.) для определения характеристик ВЭП и прогноза показателей ВЭУ является программный комплекс WAsP (RISO, Дания) [5]. WASP основан на численной методике моделирования энергетических характеристик ветра и ВЭУ по данным многолетних измерений ветра на метеорологических станциях на высоте 10–15 м и их экстраполяции по логарифмическому закону на высоте до 200 м с учетом шероховатости поверхности [5].

Концепция методики WAsP предусматривает использование в расчетах среднегодовых параметров ветра, плотности воздуха, карт рельефа региона, подстилающей поверхности и расположения крупных объектов, затеняющих ветер, в том числе и самих ВЭУ. Результатом являются оценки среднегодовых параметров выработки энергии ВЭУ [5].

В 11 версии WAsP заложены возможности применения не только линейных моделей, описывающих эффекты усиления и ослабления ветра по направлениям в зависимости от конкретных особенностей региона, но и моделей вычислительной гидродинамики CFD (от англ. computational fluid dynamics). Для оптимизации расста-

[1]РД 52.04.275-89. Методические указания. Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок. Утв. Государственным комитетом СССР по Гидрометеорологии от 16.08.90.

новки ВЭУ на местности, с целью получения наибольшей выработки энергии, расчетный модуль WAsP зарекомендовал себя как наиболее точный и широко используемый в мире [19].

Таблица 4

Характеристика источников информации для оценки ветроэнергетического потенциала

Table 4

Characteristic of information sources for wind energy potential assessment

Источник информации	Преимущества	Недостатки
Данные климатических справочников, метеорологических ежемесячников	1. Наибольший период наблюдений, охватывающий несколько десятилетий (с 1936 по 1980 гг.). 2. Имеются данные метеостанций, которые в настоящее время закрыты. 3. Климатические данные наземных метеостанций более точны по сравнению со спутниковыми данными	1. Климатические изменения последних десятилетий повлияли на отдельные параметры. 2. Приведены данные с интервалом осреднения за месяц. 3. Редкая сеть метеостанций. 4. Несовершенство средств измерения, относительно высокая методическая и инструментальная погрешность. 5. Данные рядов наблюдений могут быть статистически неоднородными в связи с разной периодичностью суточных измерений, различием в средствах измерений
Данные метеостанций, находящихся в открытом доступе	1. Статистически необработанные данные об измерениях до 8 раз в сутки дают более широкие возможности для анализа. 2. Охват большинства стран мира. 3. Данные получены с широким использованием автоматизированных систем измерения с низкой методической и инструментальной погрешностью. 4. Климатические данные наземных метеостанций точнее по сравнению со спутниковыми данными	1. Сравнительно короткий период наблюдений – от 5 до 15 лет. 2. Для обработки данных необходимо применение программных продуктов. 3. Редкая сеть метеостанций
Данные спутниковых наблюдений	1. Высокая детализация климатических данных на глобальной сетке с шагом от 0,5 до 1°, охватывающей весь земной шар. 2. Данные за период нескольких десятков лет. 3. Учет рельефа местности и подстилающей поверхности	1. Приведены данные с интервалом осреднения за сутки, месяц. 2. Низкая точность оценки локального ВЭП при значительных топографических вариациях [18]

К несовершенству теоретической методики WAsP, помимо большой зависимости от точности параметров подстилающей поверхности и использования в ней не всегда адекватных моделей вертикальных логарифмических профилей скорости ветра, следует отнести также ее ориентированность на определение, в основном среднегодовых значений скоростей ветра, функций распределения ветра по скоростям, плотности воздуха по данным одной ближайшей метеостанции. Эти приближения в известной мере оправданы для европейских условий с относительно небольшими перепадами климатических условий в течение года. В российских условиях отсутствие учета сезонных климатических изменений может как количественно, так и качественно влиять на результаты определения характеристик ВЭП, технико-экономических и энергетических показателей ВЭС [5, 20]. Как показано в [5], погрешности расчета скорости ветра на высоте 100 м методикой WAsP относительно данных метеорологических станций достигают 40–60%.

Альтернативный подход к оценке ВЭП разработан в НИЦ «Атмограф» [6]. Методика моделирования характеристик ВЭП реализована в программном комплексе «Восток», совмещенном с базой многолетних метеорологических и аэрологических данных «Флюгер».

База данных «Флюгер» содержит многолетние измерения характеристик ветра на государственной сети метеорологических станций: данные о высотных профилях скорости ветра; функции распределения и данные о давлении, температуре, плотности и влажности воздуха, информацию о периодах наблюдений, высоты расположения станций и анемометров; характеристики рельефа и подстилающей поверхности в местах расположения метеорологических и аэрологических станций по принятой в СССР и в современной России классификации Милевского [6, 21]. Значения наиболее вероятных характеристик ветра между станциями на заданной высоте определяются средствами физико-статистического моделирования.

Методика оценки ВЭП, разработанная Научно-информационным центром «Атмограф», использует статистически установленный квазилинейный характер связей между удельной мощностью, а также коэффициентом использования установленной мощности ВЭУ и высотным профилем средней скорости ветра. В методике учитываются факторы, снижающие теоретически возможную выработку ВЭУ и определяемые интегральным коэффициентом неидеальности[2] [6], который представляет собой произведение ряда составляющих. В их числе – нелинейности высотного профиля скорости и направления ветра, которые приводят к снижению до 3–4% мощности ВЭУ с большими диаметрами ветроколеса и высоты башни; инерционность системы ориентации ветроколеса ВЭУ с уменьшением мощности на 1–3%; влияние ветрового затенения ВЭУ в составе ВЭС с возможным снижением выработки электроэнергии на 3–4%; потери электроэнергии во внутренних сетях, составляющие до 2% выработки, и собственные нужды – до 1%.

Рассмотренные методики оценки ВЭП используют осредненные за год или месяц климатические данные. Это не позволяет решать ряд задач, в которых требуется оценка:

– ВЭП с дифференциацией по направлениям ветра;

– часового ВЭП;

– часового ВЭП во взаимосвязи с другими климатическими данными.

Далее рассматривается программа для ЭВМ Wind-МСА[3], особенность которой состоит в использовании статистически необработанных данных многолетних из-

[2]Николаев В.В. Обоснование параметров ветродизельных энергокомплексов с учетом местного ветропотенциала и графиков нагрузки: дис. … канд. техн. наук: 05.14.08. М., 2016. 147 с.

[3]Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014619044. Многокритериальная оценка эффективности использования ветроэнергетических установок (Wind-МСА) / В.А. Шакиров, А.Ю. Артемьев. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08.09.2014 г.

мерений метеостанций, находящихся в открытом доступе, что расширяет спектр возможностей при проведении ветроэнергетических исследований.

4. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ Wind-MCA

Исходные данные для работы Wind-MCA могут быть импортированы с интернет ресурса [16], предоставляющего архивные статистически необработанные многолетние измерения метеостанций России и других стран. Поскольку измерения на метеостанциях проводятся 4–8 раз в сутки, то для получения значений скорости ветра между интервалами измерений принимается допущение о линейном изменении скорости ветра.

На рис. 2 показан рабочий экран программы при анализе ВЭП, представлен пример графика изменения скорости ветра за месяц и выработки электроэнергии ВЭУ Condor Air 50 по данным метеостанции п. Эвенск, Магаданская область.

Выработка электроэнергии ВЭУ за исследуемый период проводится по формуле:

$$W = \sum_{i=1}^{n} P(V_i)T_i, \qquad (1)$$

где $P(V_i)$ – электрическая мощность ВЭУ, соответствующая скорости ветра V_i на i-м интервале измерения, кВт; T_i – продолжительность интервала измерения, ч; n – число интервалов времени в рассматриваемом периоде.

Значения $P(V_i)$ для каждого интервала измерения определяются по мощностной характеристике ВЭУ. При этом скорость ветра, измеренная на высоте флюгера метеостанции, приводится к высоте ротора ВЭУ:

$$V_i = V_{\text{изм}} \left(\frac{h_i}{h_{\text{изм}}} \right)^m, \qquad (2)$$

где V_i – скорость ветра на высоте ротора ВЭУ h_i, м/с, $V_{\text{изм}}$ – скорость ветра на высоте флюгера метеостанции $h_{\text{изм}}$, м/с, m – степенной коэффициент, зависящий от скорости ветра и шероховатости подстилающей поверхности [22].

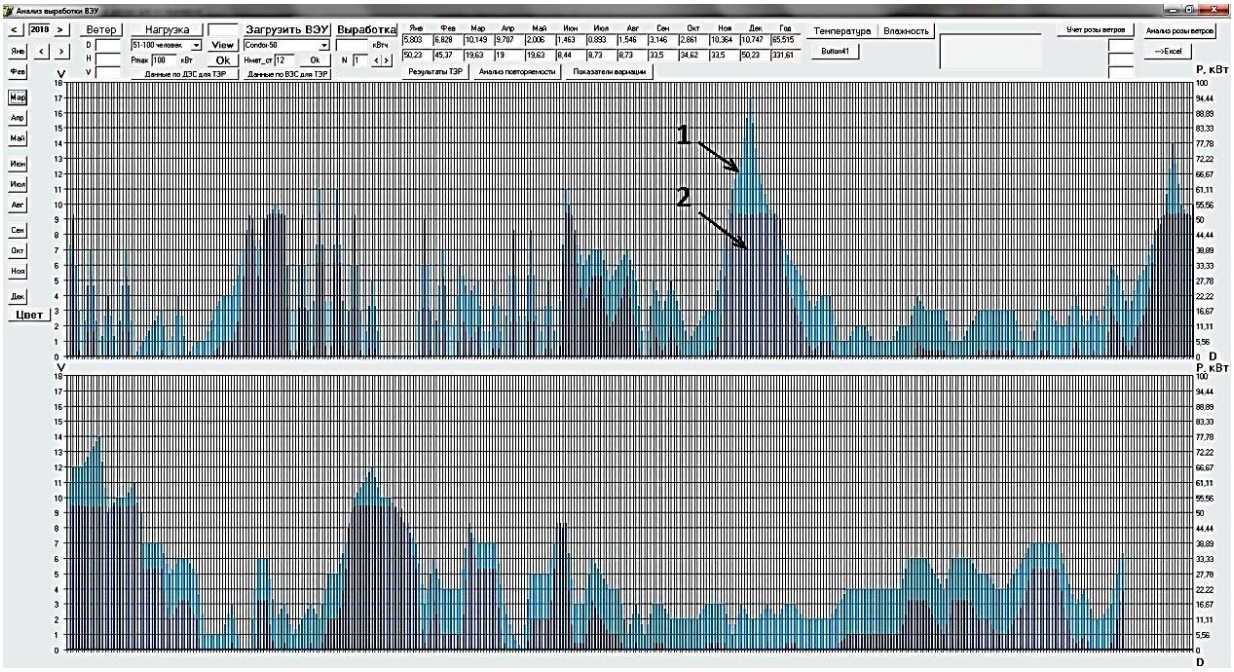


Рис. 2. Рабочий экран программы Wind-MCA: 1 – скорость ветра; 2 – выработка электроэнергии ветроэнергетической установкой
Fig. 2. Wind-MCA run screen: 1 – wind speed; 2 –power generation by a wind farm

Программа Wind-MCA позволяет совместить график выработки электроэнергии ВЭУ с суточным графиком электрических нагрузок. В результате анализа совмещенных графиков оценивается доля востребованной потребителями электроэнергии в общей ее выработке ВЭС за различные периоды времени. Такая информация служит для определения параметров аккумулирующих устройств в изолированных районах для оценки перспективной совместной выработки мощности нескольких сетевых ВЭС, удаленных на несколько десятков километров друг от друга.

Для проведения анализа повторяемости скоростей ветра по градациям программа использует данные за месяц, год, несколько лет (рис. 3).

Анализ повторяемости скоростей ветра в программе включает возможность определения параметров распределения Вейбулла по данным многолетних наблюдений. Это позволяет проводить дополнительные исследования с помощью программных продуктов, использующих распределение Вейбулла в качестве исходных данных.

На рис. 3 также представлен этап сравнения ВЭУ по мощностным характеристикам. График 1 отражает выработку электроэнергии ВЭУ за месяц и год на каждой градации скорости ветра с учетом характерной для исследуемого района повторяемости скоростей ветра, график 2 соответствует мощностной характеристике выбранной ВЭУ. Сравнительный анализ позволяет подобрать модель ВЭУ, технически наиболее соответствующую ветровым условиям района.

5. ПРИМЕНЕНИЕ WIND-MCA ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА

Статистически необработанные данные метеостанций, используемые Wind-MCA, позволяют решать задачи оценки ветроэнергетического потенциала с часовой детализацией и во взаимосвязи с другими климатическими данными. Рассмотрим применение Wind-MCA на примере трех задач оценки ВЭП с часовой детализацией.

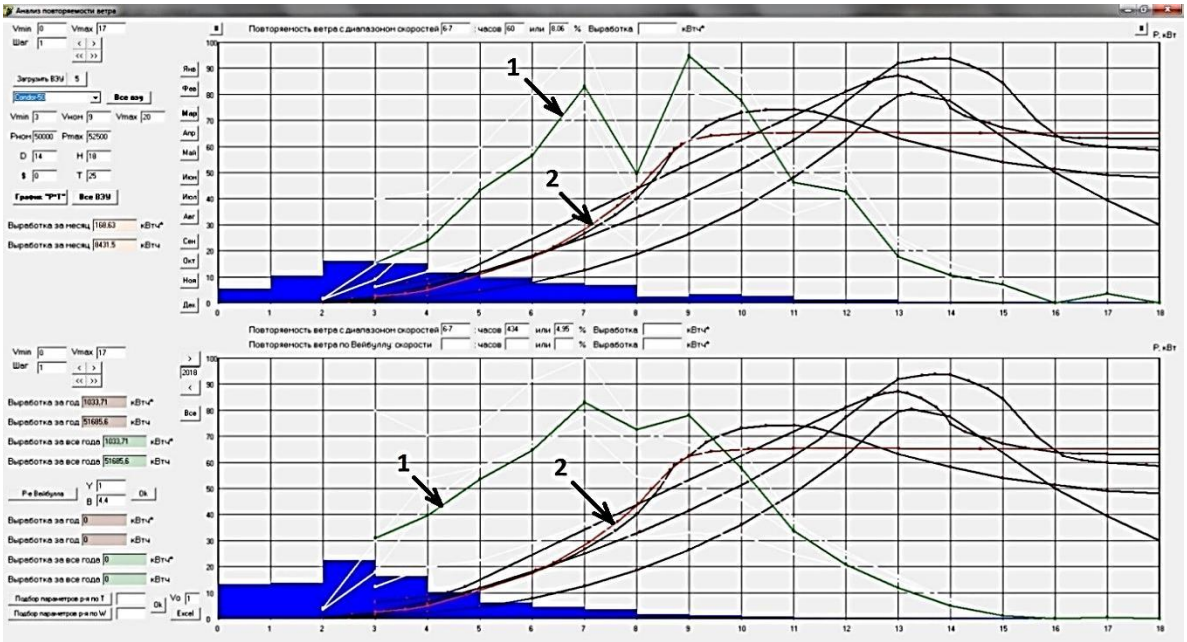


Рис. 3. Анализ повторяемости скорости ветра по градациям за месяц и год в программе Wind-MCA:
1 – выработка электроэнергии ветроэнергетической установки по градациям скорости ветра;
2 – график мощностной характеристики выбранной ветроэнергетической установки
Fig 3. Analysis of wind speed repeatability by gradations: per month and year in the Wind-MCA program:
1 – wind farm power generation by wind speed gradations; 2 – power curve of the selected wind power plant

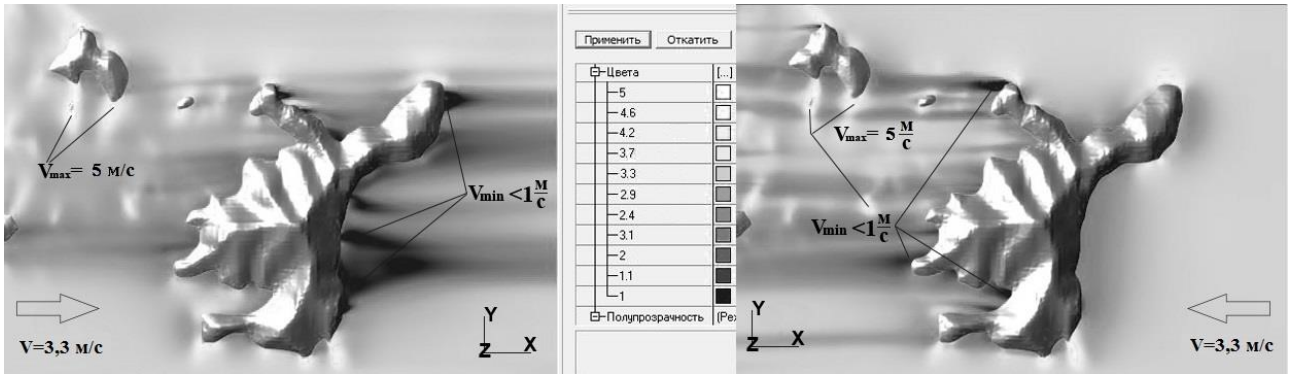


Рис. 4. Результаты аэродинамического моделирования в программе FlowVision
Fig. 4 Results of aerodynamic modeling in the FlowVision program

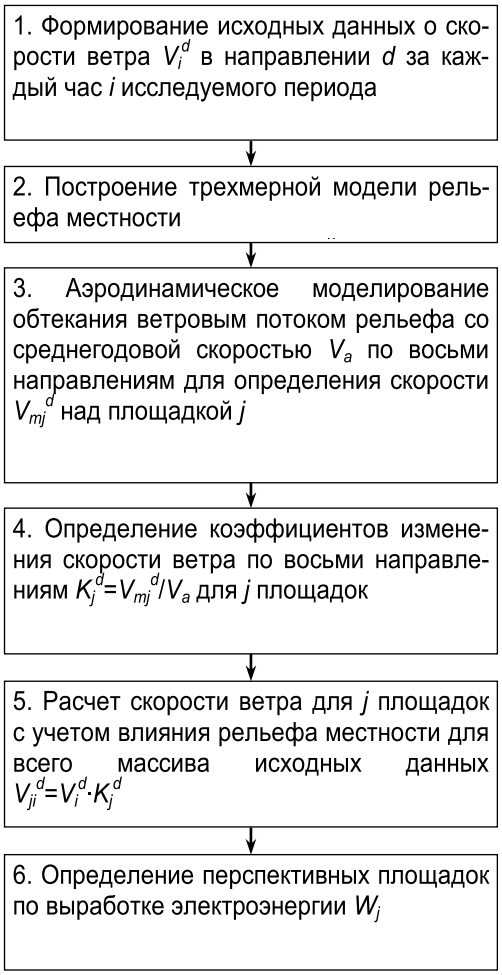


Рис. 5. Методика оценки ветроэнергетического потенциала с учетом рельефа местности
Fig. 5. Methods for assessing a wind energy potential taking into account the terrain relief

1. Оценка ВЭП с дифференциацией по направлениям ветра. Рельеф местности оказывает существенное влияние на ВЭП района. Wind-MCA позволяет учесть результаты аэродинамического моделирования цифровой модели рельефа местности, выполненного в программах вычислительной гидродинамики, например FlowVision, OpenFOAM и т.д. [23] (рис. 4). Методика оценки ВЭП с учетом рельефа местности представлена на рис. 5.

Результаты применения методики для оценки ВЭП полуострова Аян Хабаровского края представлены в работах [23, 24]. Были определены площадки, на которых, вследствие влияния рельефа местности, среднее увеличение скорости ветра составило 1,4 и 1,7 раза.

6. ОЦЕНКА ЧАСОВОГО ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА

При вводе ветроэнергетических мощностей необходимо учитывать ряд особенностей, связанных с невозможностью точного прогноза энергоресурса даже в краткосрочной перспективе, к примеру, вероятностью штиля или штормовой скорости ветра, при которых выработка электроэнергии ВЭС прекращается. В случае, когда ВЭС работает параллельно с энергосистемой, непостоянство энергоресурса приводит к колебаниям мощности и угрозе нарушения устойчивости режима [9, 25].

Территориальное распределение ВЭС по энергосистеме является очень эффективным способом решения проблемы краткосрочной изменчивости поступления энергоресурса [26]. Так как снижение скорости ветра одновременно на всех станци-

ях менее вероятно, повышается годовая продолжительность выработки электроэнергии группы распределенных по территории ВЭС. Также менее вероятно и одновременное повышение скорости на всех станциях. Поэтому количество часов с максимальной суммарной мощностью уменьшается, по сравнению с вариантом концентрированного размещения группы ВЭС.

Для оценки вариантов распределенного размещения ВЭС используется график продолжительности выработки мощности, показывающий число часов работы станций с определенной мощностью [26].

Wind-MCA реализует построение графика продолжительности выработки мощности ВЭС по данным метеостанций. Проведем оценку эффектов распределенного размещения ВЭС на примере Республики Бурятия для п. Бабушкин и п. Кабанск, расположенных на побережье оз. Байкал. В качестве модели рассмотрим Vestas V90 с номинальной мощностью 2 МВт, имеющей стартовую скорость 3 м/с и высоту мачты 95 м. При оценке были использованы статистически необработанные данные метеостанций в п. Бабушкин и п. Кабанск за 2018 г.

На рис. 6 показаны графики продолжительности выработки группы ВЭУ Vestas V90 для трех вариантов:

1) все ВЭУ размещены в п. Бабушкин;

2) все ВЭУ размещены в п. Кабанск;

3) распределенное размещение ВЭУ в п. Бабушкин и п. Кабанск.

Были получены следующие результаты моделирования выработки электроэнергии ВЭУ. При сосредоточенном размещении ВЭУ в п. Кабанск или п. Бабушкин число часов работы с номинальной мощностью составляет 250 и 418 ч, соответственно. Число часов с ненулевой выработкой – 6646 (п. Кабанск) и 6258 (п. Бабушкин).

При рассредоточенном размещении в двух пунктах число часов работы ВЭУ с суммарной номинальной мощностью уменьшилось до 78 ч, но число часов с ненулевой выработкой увеличилось до 7653 ч. График продолжительности нагрузки более пологий и сглаженный, выработка ВЭС становится более прогнозируемой.

Таким образом, используя статистически необработанные данные метеостанций, Wind-MCA позволяет проводить оценку вариантов распределенного размещения сетевых ВЭС.

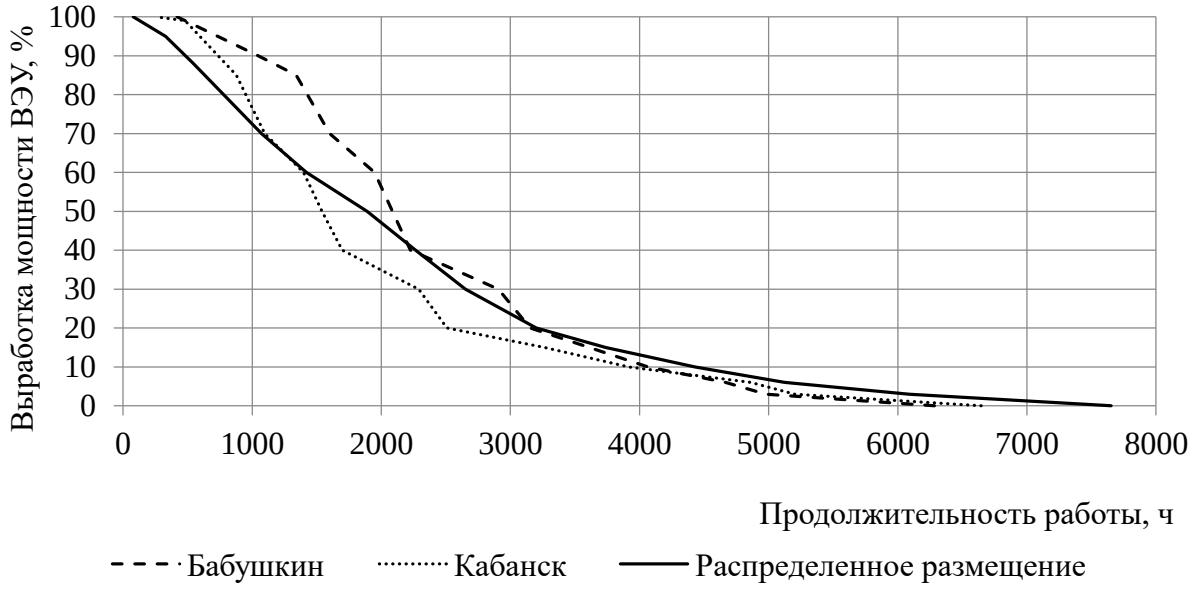


Рис. 6. Графики продолжительности работы ветроэлектростанций с определенной мощностью
Fig. 6. Graphs of wind farm operating time with a certain capacity

7. ОЦЕНКА ЧАСОВОГО ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ВО ВЗАИМОСВЯЗИ С ДРУГИМИ КЛИМАТИЧЕСКИМИ ДАННЫМИ

Одной из специальных возможностей программы Wind-МСА является учет влияния обледенения лопастей на выработку энергии ВЭУ. Результаты исследований для северных территорий говорят о существенных потерях мощности ВЭУ (до 50%) вследствие гололедообразования [27, 28]. Для условий России, где основной ВЭП сосредоточен на севере, такая оценка имеет особое значение. Полученные результаты могут использоваться для экономического обоснования различных пассивных или активных средств борьбы с обледенением ВЭУ.

В работе [29] представлены результаты исследования влияния различной степени обледенения лопастей ВЭУ на мощностные характеристики (рис. 7). Аналогичные характеристики могут быть сформированы в Wind-МСА для оценки потерь мощности от обледенения ВЭУ (рис. 8).

В табл. 5 представлены условия, при которых может произойти обледенение лопастей ВЭУ различной степени.

Так как Wind-МСА использует статистически необработанные архивные данные метеостанций, то в результате анализа определяются количество и длительность случаев обледенения лопастей ВЭУ. На рис. 9 представлен пример анализа обледенения ВЭУ, расположенной в п. Анабар (Якутия), для октября 2005 г.

Программа позволяет корректировать условия образования и перехода различных степеней обледенения, получать значения потерь электроэнергии, связанных с обледенением, за различный период времени и получать оценку целесообразных затрат на реализацию мероприятий по борьбе с гололедообразованием.

В табл. 6 приведены результаты расчета выработки электроэнергии ВЭУ для различных районов востока России, а также оценки потерь электроэнергии из-за обледенения. Данные метеостанций для рассматриваемых районов охватывают измерения за период 2006–2018 гг., за исключением с. Каменское (2010–2018 гг.), с. Чумикан (2011–2018 гг.). Анализ проводился для модели ВЭУ Condor Air с номинальной мощностью 50 кВт, имеющей стартовую скорость 3 м/с и высоту мачты 18 м.

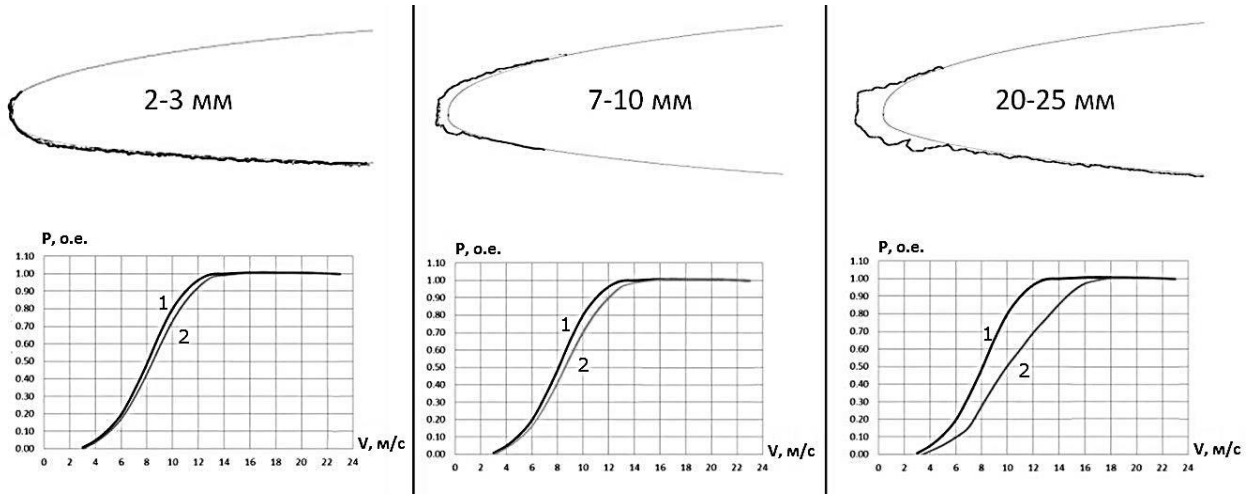


Рис. 7. Влияние различной степени обледенения лопастей ветроэнергетических установок на мощностную характеристику: 1 – без обледенения; 2 – с обледенением; a – начальная степень; b – легкая наледь; c – существенное обледенение
Fig. 7. Effect of various degrees of wind turbine blade icing on power curves: 1 – without icing; 2 – with icing; a – initial icing; b – light icing; c – strong icing

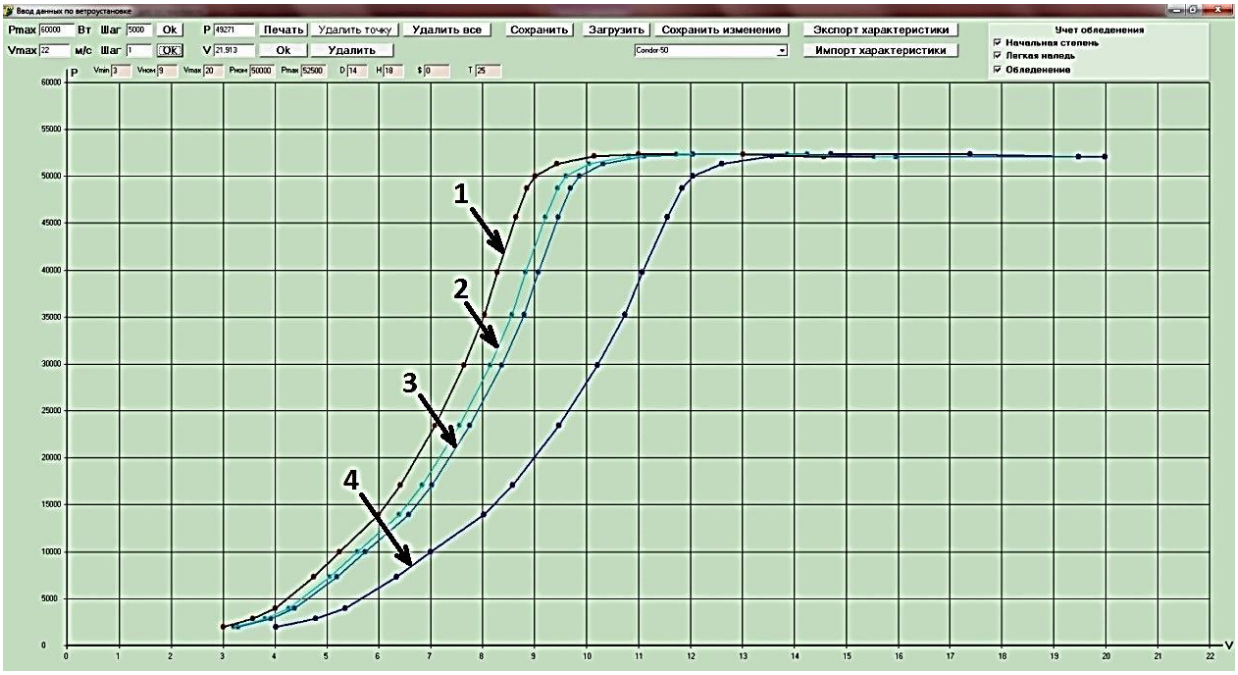


Рис. 8. Мощностные характеристики ветроэнергетической установки Condor Air при различной степени обледенения лопастей: 1 – без обледенения; 2 – начальная степень; 3 – легкая наледь; 4 – существенное обледенение
Fig. 8. Power curves of Condor Air wind turbine under various degrees of blade icing 1 – without icing; 2 – initial icing; 3 – light icing; 4 – strong icing

Таблица 5

Условия обледенения лопастей ветроэнергетических установок

Table 5

Wind turbine blade icing conditions

Климатические условия	Степень обледенения			
	Кристаллический налет	Ледяной и зернистый налет		Стекловидный лед
	Условия образования			
	Туман; дымка	Туман	Снег с дождем; ледяной дождь; изморось	Понижение температуры ниже нуля во время или после выпадения осадков
0…-5°C	–	Зернистая изморозь	гололед	гололедица
-6…-10°C	–	Зернистая изморозь	гололед	–
-11…-17°C	Кристаллическая изморозь	–	–	–
-18…-25°C Влажность 80–91%	Кристаллическая изморозь	–	–	–
-26…-35°C Влажность 75–88%	Кристаллическая изморозь	–	–	–

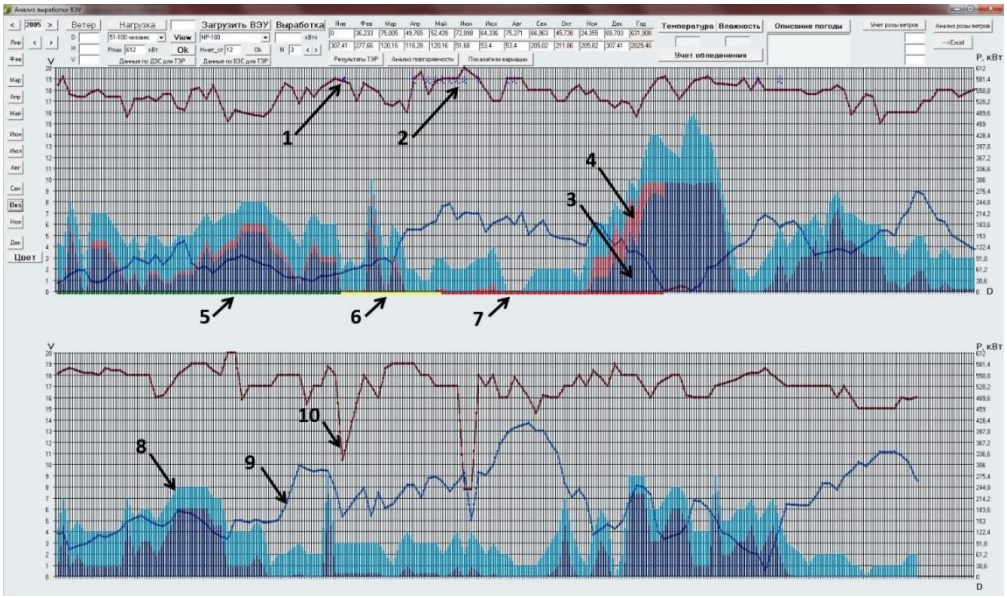


Рис. 9. Анализ климатических условий возникновения обледенения ветроэнергетических установок: 1 – дождь; 2 – дымка; 3 – выработка электроэнергии ветроэнергетических установок; 4 – потери электроэнергии из-за обледенения лопастей; 5 – начальная степень обледенения; 6 – легкая наледь; 7 – существенное обледенение; 8 – скорость ветра; 9 – температура; 10 – влажность
Fig. 9. Analysis of climatic conditions causing wind turbine icing: 1 – rain; 2 – haze; 3 – wind farm power generation; 4 – power losses due to blade icing; 5 – initial icing; 6 – light icing; 7 – strong icing; 8 – wind speed; 9 – temperature; 10 – humidity

Таблица 6

Выработка электроэнергии ветроэнергетических установок и оценка потерь из-за обледенения лопастей ветроэнергетических установок

Table 6

Wind turbine power generation and estimation of power losses due to wind turbine blade icing

Район	Средне-годовая скорость ветра, м/с	Среднегодовая выработка электроэнергии, кВт·ч		Потери, %	Район по гололеду
		без учета обледенения	с учетом обледенения		
Хабаровский край					
о. Большой Шантар	3,3	56633,5	46820,9	17,3	VII
с.Чумикан	4,0	88325,3	79869,9	9,8	IV
п. Охотск	3,6	58121,5	49715,1	14,6	VI
п. Аян	2,7	35252,4	32746,4	6,9	VI
Республика Саха (Якутия)					
с. Казачье	2,9	46511,6	43617,4	6,2	III
с. Усть-Оленек	4,4	109076,5	100373,3	7,8	III
с. Юрюнг-Хая	5,3	153628,7	134927,1	12,1	III
Камчатский край					
с. Каменское	3,5	69182,7	62668,9	9,2	IV
Магаданская область					
п. Эвенск	3,8	82317,2	63666,5	23,7	IV
с. Ямск	5,8	157733,3	137823,3	12,8	VI

Можно отметить, что для большинства рассмотренных пунктов большая величина потерь электроэнергии соответствует большему классу района по гололеду[4]. Исключением являются п. Аян и п. Эвенск. Это объясняется несовпадением проявления высокого ветропотенциала и погодных условий, обусловливающих обледенение лопастей ВЭУ.

Результаты оценки потерь электроэнергии позволяют сделать выводы о целесообразном уровне защиты обледенения, которую необходимо предусмотреть при вводе ветроэнергетических мощностей в районе.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ современного состояния и перспектив развития ветроэнергетики в мире и России.

2. Выполнен обзор методических подходов и программного обеспечения для оценки ВЭП с использованием осредненных за различный период климатических данных.

3. Представлена разработанная программа Wind-МСА, использующая статистически необработанные данные многолетних измерений метеостанций для решения задач оценки ВЭП с часовой детализацией во взаимосвязи с другими климатическими данными.

4. Представлена методика учета влияния рельефа местности на скорость ветра в зависимости от его направления, приведены результаты оценки ВЭП для района с. Аян Хабаровского края.

5. Изложен подход к оценке вариантов распределенного размещения сетевых ВЭС для уменьшения влияния краткосрочной изменчивости скорости ветра на колебания мощности станций. Приведены результаты моделирования выработки электроэнергии ВЭС при их концентрированном и распределенном размещении в Кабанском районе Республики Бурятия.

6. Представлен реализованный в Wind-МСА новый подход к учету влияния обледенения лопастей на выработку электроэнергии ВЭУ. Приведены результаты расчета ВЭП для различных районов востока России. Среднегодовые потери электроэнергии из-за обледенения варьируются в исследованных районах от 6,2 до 23,7%.

Библиографический список

1. Гимади В., Амирагян А., Поминова И., Курдин А., Колобов О., Мартынюк А. и др. Оборудование для ВИЭ-генерации в России // Энергетический бюллетень. 2019. № 73. С. 19–22. [Электронный ресурс]. URL: http://ac.gov.ru/files/publication/a/22855.pdf (16.04.2019).

2. Иванова И.Ю., Ноговицын Д.Д., Тугузова Т.Ф., Шеина З.М., Сергеева Л.П. Ветроэнергетические ресурсы г. Верхоянска Республики Саха (Якутия) и возможность их использования для энергоснабжения // Фундаментальные исследования. 2013. № 4. С. 30–38.

3. Восточный вектор энергетической стратегии России: современное состояние, взгляд в будущее / Под ред. Н.И. Воропая, Б.Г. Санеева. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2011. 368 с.

4. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Ижболдин А.К. Автономные энергоисточники на Севере Дальнего Востока: характеристика и направления диверсификации // Пространственная экономика. 2018. № 1. С. 101–116. https://doi.org/10.14530/se.2018.1.101-116

5. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И., Николаев В.В. Методические основы нового атласа ветровых ресурсов России и стран СНГ // Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность: сб. тр. конф. (г. Сколково, 13-14 октября 2016 г.). Сколково: Изд-во Объединенного института высоких температур РАН, 2016. С. 72–78.

6. Ганага С.В., Кудряшов Ю.И., Николаев В.Г., Николаев В.В., Сон Э.Е. К развитию методик моделирования показателей ветроэнергетических станций на территории России и стран СНГ // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. № 4. С. 56–76.

7. Renewables 2019, Global Status Report // Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. 2019. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ren21.net/gsr-2019/ (16.04.2019).

[4]Правила устройства электроустановок. Передача электроэнергии. Разд. 2, главы 2.4, 2.5. 7-е изд. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. 160 с.

8. Global Wind Energy Council // Global Wind Report 2018. [Электронный ресурс]. URL: https://gwec.net/global-wind-report-2018/ (19.04.2019).
9. Рахманов Н.Р., Курбацкий В.Г, Гулиев Г.Б., Томин Н.В. Краткосрочное прогнозирование выработки мощности ветроэнергетических установок для обеспечения надежности электрических сетей // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: актуальные проблемы надежности систем энергетики: сб. тр. Междунар. науч. семинара им. Ю.Н. Руденко (г. Минск, 07–11 сентября 2015 г.). Минск: Изд-во БНТУ, 2015. Вып. 66. С. 397–403.
10. Елистратов В.В. Энергетическое снабжение изолированных территорий России // Академия энергетики. 2015. № 4. С. 26–33.
11. Клер А.М., Деканова Н.П., Санеев Б.Г., Щеголева Т.П. Оптимизация развития и функционирования автономных энергетических систем. Новосибирск: Наука, 2001. 144 с.
12. Иванова И.Ю., Ноговицын Д.Д., Тугузова Т.Ф., Шакиров В.А., Шеина З.М., Сергеева Л.П. Факторы, влияющие на эффективность использования ветропотенциала в локальной энергетике Якутии // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. № 1. С. 84–92.
13. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф. Использование возобновляемых источников энергии как одно из приоритетных направлений совершенствования систем энергоснабжения труднодоступных территорий восточных регионов // Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность, 2016: материалы Междунар. конгресса REENCON-XXI (г. Сколково, 13-14 октября 2016 г.). Сколково: Изд-во Объединенного института высоких температур РАН, 2016. С. 136–142.
14. Zobaa A.F., Bansal R.C. Handbook of Renewable Energy Technology. Queensland: World Scientific Publishing Company, 2011. 876 p. https://doi.org/10.1142/7489
15. Рекомендации по определению климатических характеристик ветроэнергетических ресурсов. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 80 с.
16. Погода в 243 странах мира // Расписание погоды [Электронный ресурс]. URL: http://rp5.ru (17.05.2019).
17. POWER Project Data Sets // NASA Prediction of Worldwide Energy Resources [Электронный ресурс]. URL: https://power.larc.nasa.gov/ (17.05.2019).
18. Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю. Использование климатических баз данных для оценки природно-ресурсного и технического потенциала ветровой энергии // Вестник аграрной науки Дона. 2010. № 1. С. 27–32.
19. Николаев В.Г. Развитие технологий определения ветроэнергетического потенциала России // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2011. № 2. С. 68–76.
20. Николаев В.В. К развитию методики определения оптимального состава и типоразмера ветродизельных энергокомплексов с учетом местных ветроклиматических условий // Науковий вісник нубіп України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. № 240. С. 236–246.
21. Николаев В.Г. Ресурсное и технико-экономическое обоснование широкомасштабного развития и использования ветроэнергетики в России. М.: Изд-во “Атмограф”, 2011. 501 с.
22. Рыхлов А.Б. Закономерности изменения средней скорости ветра с высотой в приземном слое атмосферы на юго-востоке европейской территории России для решения задач ветроэнергетики // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 20. С. 89–99.
23. Шакиров В.А., Артемьев А.Ю. Оценка ветроэнергетического потенциала района средствами компьютерного моделирования // Прикладная информатика. 2015. Т. 10. № 4. С. 93–104.
24. Шакиров В.А., Артемьев А.Ю. Выбор площадки размещения ветроэлектростанции с использованием компьютерного моделирования рельефа местности и ветрового потока // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 11. С. 133–143. http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-133-143
25. Стенников В.А., Жарков С.В. ВЭС в энергосистемах: проблемы и решения // Энергетика и ТЭК. 2014. № 5. С. 46–47.
26. Reichenberg L., Wojciechowski A., Hedenus F., Johnsson F. Geographic aggregation of wind power–an optimization methodology for avoiding low outputs // Wind Energy. 2017. Vol. 20. Issue 1. P. 19–32. https://doi.org/10.1002/we.1987
27. Parent O., Ilinca A. Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review // Cold Regions Science and Technology. 2011. Vol. 65. Issue 1. P. 88–96. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.01.005
28. Elistratov V., Denisov R. Justification of Wind Turbine Operation and Management Modes for Russian Arctic Conditions // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. P. 1–5. [Электронный ресурс]. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8076219 (17.05.2019).
http://dx.doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076219
29. Rissanen S., Lehtomäki V., Wennerkoski J., Wadham-Gagnon M., Sandel K. Modelling load and vibrations due to iced turbine operation // Wind Engineering. 2016. Vol. 40. Issue 3. P. 293–303. https://doi.org/10.1177/0309524X16645484

References

1. Gimadi V, Amiragyan A, Pominova I, Kurdin A, Kolobov O, Martynyuk A, et al. Equipment for renewable energy generation in Russia. *Jenergeticheskij bjulleten'* = Energy Bulletin. 2019;73:19–22. Available from:

http://ac.gov.ru/files/publication/a/22855.pdf [Accessed 16th April 2019]. (In Russ.)
2. Ivanova IY, Nogovitsyn DD, Tuguzova TF, Sheina ZM, Sergeeva LP. Wind energy resources in Verkhoyansk town of the Sakha Republic (Yakutia) and the possibility of their use for power supply. *Fundamental'nye issledovanija* = Fundamental research. 2013; 4:30–38. (In Russ.)
3. The eastern vector of Russia's energy strategy: state of the art and prospects / Ed. NI Voropai, BG Saneev. Novosibirsk: *Akademicheskoe izdatel'stvo* GEO; 2011, 368 p. (In Russ.)
4. Saneev BG, Ivanova IY, Tuguzova TF, Izhbuldin AK. Autonomous energy sources in the north of the Far East: Current state and directions of diversification. *Prostranstvennaja jekonomika* = Spatial Economics. 2018;1:101–116.
https://doi.org/10.14530/se.2018.1.101-116 (In Russ.)
5. Nikolaev VG, Ganaga SV, Kudryashov YuI, Nikolaev VV. Methodological foundations of a new atlas of wind resources of Russia and the CIS countries. In: *Vozobnovlyaemaya energetika XXI vek: Energeticheskaya i ekonomicheskaya effektivnost': sbornik trudov konferencii* = Renewable power generation of XXI century: Energy and economic efficiency. 13-14 October 2016, Skolkovo. Skolkovo: Publishing House of the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences; 2016:72–78. (In Russ.)
6. Ganaga SV, Kudryashov YI, Nikolaev VG, Nikolaev VV, Son EE. On the development of the techniques of wind power stations parameters modeling in Russia and CIS countries. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika* = Thermal Engineering. 2017;4:56–76. (In Russ.)
7. Renewables 2019, Global Status Report. *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2019.* Available from: http://www.ren21.net/gsr-2019/ [Accessed 16th April 2019].
8. Global Wind Energy Council. *Global Wind Report 2018*. Available from: https://gwec.net/global-wind-report-2018/ [Accessed 19th April 2019].
9. Rahmanov NR, Kurbackij VG, Guliev GB, Tomin NV. Short-term forecasting of wind farm power generation to ensure electric network reliability. In: *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki: aktual'nye problemy nadezhnosti sistem energetiki: sbornik trudov Mezhdunarodnogo nauchnogo seminara imeni Yu.N. Rudenko* = Methodological issues of researching large energy system reliability: relevant problems of energy system reliability. 07–11 September 2015, Minsk. Minsk: Belarusian National Technical University; 2015, issue 66, p. 397–403.
10. Elistratov VV. Energy supply of isolated territories of Russia. *Akademiya energetiki* = Energy Academy. 2015;4:26–33. (In Russ.)
11. Kler AM, Dekanova NP, Saneev BG, Schegoleva TP. Optimization of stand-alone energy systems development and operation. Novosibirsk: Nauka; 2001, 144 p. (In Russ.)
12 Ivanova IYu, Nogovitsyn DD, Tuguzova TF, Shakirov VA, Sheina ZM, Sergeyeva LP. Factors affecting the wind resource utilization efficiency in the energy sector of the Sakha Republic. *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Jenergetika* = Thermal Engineering. 2017;1:84–92. (In Russ.)
13. Saneev BG, Ivanova IYu, Tuguzova TF. Use of renewables as one of the priority directions for improving energy supply systems in remote areas of the eastern regions. In: *Vozobnovlyaemaya energetika XXI vek: energeticheskaya i ekonomicheskaya effektivnost', 2016: materialy Mezhdunarodnogo kongressa REENCON-XXI* = Renewable energy of XXI century: Energy and Economic Efficiency, 2016: Proceedings of the International Congress REENCON-XXI. Skolkovo, 13-14 October 2016, Skolkovo. Skolkovo: Publishing House of the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences; 2016, p. 136–142. (In Russ.)
14. Zobaa AF, Bansal RC. Handbook of Renewable Energy Technology. Queensland: World Scientific Publishing Company, 2011. 876 p. https://doi.org/10.1142/7489
15. Recommendations for determining climatic characteristics of wind energy resources. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1989, 80 p. (In Russ.)
16. Weather in 243 countries. *Weather Schedule.* Available from: http://rp5.ru [Accessed 17th May 2019].
17.POWER Project Data Sets. *NASA Prediction of Worldwide Energy Resources.* Available from: https://power.larc.nasa.gov/ [Accessed 17th May 2019].
18. Kiseleva S.V., Rafikova J.Y. Using of the climatic data-bases for estimation nature-re-source and technical potential of wind energy // *Vestnik agrarnoj nauki Dona* = Don Agrarian Science Bulletin. 2010;1:27–32. (In Russ.)
19. Nikolaev VG. Development of technologies for determining the wind energy potential of Russia. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* = St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology 2011;2:68–76. (In Russ.)
20. Nikolaev VV. Optimization of characteristics and composition of the hybrid energy systems based on diesel generators. *Nauchnyj vestnik Ukrainy. Serija: tehnika i jenergetika agropromyshlennogo kompleksa* = Machinery and Energetics. 2016;240:236–246.
21. Nikolaev VG. *Resource and feasibility study of the large-scale development and use of wind energy in Russia*. Moscow: Atmograf; 2011, 501 p. (In Russ.)
22. Rikhlov AB. Laws of change of average speed of the wind with height in the ground layer of atmosphere on south-east European part of Russia for the decision of problems wind power. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* = Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. 2011;20: 89–99. (In Russ.)
23. Shakirov VA, Artemiev AYu. Computer simulation in solving the problem of estimating the wind power potential of the region. *Prikladnaja informatika* = Applied in-

formatics. 2015; 10(4): 93–104. (In Russ.)
24. Shakirov V.A., Artemiev A.Yu. Wind farm siting using computer modeling of terrain relief and wind flow. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2017;21(11):133–143. (In Russ.) http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-133-143
25. Stennikov VA, Zharkov SV. Wind farms in power systems: problems and solutions. *Jenergetika i toplivno-jenergeticheskij kompleks* = Energy and Fuel and Energy Complex. 2014.5:46–47. (In Russ.)
26. Reichenberg L, Wojciechowski A, Hedenus F, Johnsson F. Geographic aggregation of wind power – an optimization methodology for avoiding low outputs. Wind Energy. 2017;20(1): 19–32. https://doi.org/10.1002/we.1987
27. Parent O, Ilinca A. Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review. Cold Regions Science and Technology. 2011;65(1):88–96. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.01.005
28. Elistratov V, Denisov R. Justification of Wind Turbine Operation and Management Modes for Russian Arctic Conditions. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. P. 1–5. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/document/8076219 [Accessed 17th May 2019]. http://dx.doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076219
29. Rissanen S, Lehtomäki V, Wennerkoski J, Wadham-Gagnon M, Sandel K. Modelling load and vibrations due to iced turbine operation. Wind Engineering. 2016;40(3):293–303. https://doi.org/10.1177/0309524X16645484

Критерии авторства

Курбацкий В.Г., Шакиров В.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Authorship criteria

Kurbatsky V.G., Shakirov V.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Курбацкий Виктор Григорьевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры электроснабжения
и электротехники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: kurbatsky@isem.irk.ru

Шакиров Владислав Альбертович,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
энергоснабжения децентрализованных
потребителей,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130, Россия;
e-mail: shakirov@isem.irk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor G. Kurbatsky,
Dr. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Power Supply
and Electrical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: kurbatsky@isem.irk.ru

Vladislav A. Shakirov,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of the Laboratory
of Power Supply of Decentralized Consumers,
Melentiev Energy System Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: shakirov@isem.irk.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.311.29
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-164-182

Анализ режимов и выбор параметров преобразователя напряжения и контроллера максимальной мощности автономной фотоэлектрической станции

© С.Г. Обухов, А. Ибрагим
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Резюме: Цель – разработка методики выбора параметров основных компонентов автономной фотоэлектрической станции: преобразователя напряжения понижающего типа и контроллера поиска точки максимальной мощности, обеспечивающих максимально эффективное преобразование и использование солнечной энергии. Проведен анализ режимов и энергетических характеристик солнечных батарей при различных условиях освещения и температуры по уравнениям, описывающих физические процессы в эквивалентной электрической схеме замещения фотоэлектрического преобразователя. Выполнено имитационное моделирование динамических режимов автономной фотоэлектрической станции в программном комплексе MATLAB/Simulink. Проведен анализ основных энергетических характеристик и разработаны математические модели компонентов автономной фотоэлектрической станции для исследования режимов отслеживания точки максимальной мощности. Определены необходимые условия согласования параметров солнечной батареи и преобразователя напряжения для отслеживания точки максимальной мощности. Разработана оригинальная методика и алгоритм расчета и выбора параметров основных элементов фотоэлектрической станции. Рассмотрен практический пример расчета и выбора параметров преобразователя напряжения и цифрового контроллера максимальной мощности автономной фотоэлектрической станции. Результаты имитационного моделирования динамических режимов фотоэлектрической станции показали, что преобразователь напряжения и контроллер максимальной мощности со значениями параметров, выбранными по предложенной методике, обеспечивают надежное и эффективное отслеживание точки максимальной мощности во всех пяти рассмотренных тестовых вариантах внезапного изменения освещенности солнечных батарей. Точность отслеживания составляет не менее 98,2%, а коэффициент полезного действия преобразователя во всех рассмотренных режимах – не ниже 93,2%. Рабочие диапазоны изменения энергетических характеристик основных элементов фотоэлектрической станции соответствуют расчетным значениям, полученным при их проектировании.

Ключевые слова: фотоэлектрическая станция, контроллер максимальной мощности, понижающий преобразователь напряжения, имитационное компьютерное моделирование, параметры солнечной батареи, расчетные значения

Информация о статье: Дата поступления 18 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 24 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Обухов С.Г., Ибрагим А. Анализ режимов и выбор параметров преобразователя напряжения и контроллера максимальной мощности автономной фотоэлектрической станции. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2020. Т. 24. № 1. С. 164–182. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-164-182

Mode analysis and parameter selection of voltage inverter and maximum power controller of a stand-alone photovoltaic station

Sergey G. Obukhov, Ahmed Ibrahim
National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract: The purpose is to develop a methodology for selecting the parameters of the main components of a stand-alone photovoltaic station: a step-down voltage inverter and a maximum power point search controller, which ensure the most efficient conversion and use of solar energy. The analysis of modes and energy characteristics of solar cells under different lighting conditions and temperature is carried out using equations describing physical processes in the equivalent electrical circuit of a photoelectric converter. The dynamic modes of a stand-alone photovoltaic station are simulated in the MatLab/Simulink software package. The main energy characteristics are analyzed and mathematical models of the

components of a stand-alone photovoltaic station are developed in order to study the tracking modes of the maximum power point. The necessary conditions for matching solar battery and voltage inverter parameters to track the maximum power point are determined. An original methodology and an algorithm for calculating and selecting parameters of the main elements of a photovoltaic station are developed. Consideration is given to the practical example of calculating and selecting parameters of a voltage inverter and maximum power digital controller of a stand-alone photovoltaic station. The simulation results of dynamic modes of the photovoltaic station show that the voltage inverter and the maximum power controller with the parameter values selected according to the proposed methodology provide reliable and effective tracking of the maximum power point in all five considered test cases of sudden changes in solar cell illumination. The tracking accuracy is at least 98.2%, and the inverter efficiency in all the modes considered is at least 93.2%. The operating ranges of energy characteristic variation of the main elements of a photovoltaic station correspond to the calculated values obtained under their design.

Keywords: photovoltaic station, maximum power controller, step-down voltage converter, computer simulation, solar battery parameters, calculated values

Information about the article: Received November 18, 2019; accepted for publication December 24, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Obukhov SG, Ibrahim A. Mode analysis and parameter selection of voltage converter and maximum power controller of a stand-alone photovoltaic station. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):164–182. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-164-182

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее перспективных технологий производства электрической энергии в настоящее время является фотоэнергетика, которая на протяжении последних лет показывает наибольшую динамику развития в сравнении с другими видами возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Установленная мощность фотоэлектрических станций (ФЭС) в 2017 г. достигла отметки в 408 ГВт и привлекла 58% всех новых инвестиций в ВИЭ или 161 млрд долл. США [1]. Огромный потенциал, экологическая чистота и повсеместная доступность солнечной энергии определяют хорошие перспективы применения ФЭС в России, особенно в секторе микрогенерации, весомыми стимулами для этого являются принятые меры государственной поддержки [2–4]. За последние годы в России было установлено около 240 МВт фотоэлектрических генерирующих мощностей, а общая установленная мощность ФЭС (с учетом Крымской солнечной электростанции в 2018 г.) превысила отметку 600 МВт [5].

Основными проблемами практического применения ФЭС являются относительно невысокая эффективность преобразования первичной энергии и ярко выраженная зависимость энергетических характеристик солнечных батарей (СБ) от внешних климатических условий. В целях повышения энергетической эффективности большинство современных ФЭС строится с применением технологии отслеживания точки максимальной мощности (MPPT) (от англ. maximum power point tracking), которая позволяет увеличить выработку электроэнергии от 30 до 40%. Данная технология базируется на трех основных взаимосвязанных компонентах: MPPT-методе, MPPT-контроллере и силовом DC-DC-преобразователе. Нелинейность вольтамперных характеристик (ВАХ) СБ и их зависимость от освещенности и температуры обусловливают высокую сложность проектирования основных компонентов ФЭС. Для автономных ФЭС решение данной задачи осложняется тем, что они могут значительно различаться по топологии, типам применяемых DC-DC-преобразователей и MPPT-контроллеров. При этом известные методы по выбору параметров DC-DC-преобразователей с последующим синтезом систем управления [6, 7], широко применяемые при проектировании традиционных источников питания, для решения данной задачи малоприемлемы.

Цель исследований состояла в разработке методики выбора параметров основных компонентов автономной ФЭС, обеспечивающих максимально эффектив-

ное преобразование солнечной энергии. Для апробации и проверки полученных результатов использовалось имитационное моделирование динамических режимов ФЭС в программном комплексе MATLAB/Simulink®.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объектом исследований настоящей работы является ФЭС, предназначенная для электроснабжения потребителей, изолированных от центральной электрической сети. С точки зрения базовой архитектуры можно выделить три основных варианта построения автономных ФЭС (рис. 1).

В простейшей конфигурации (схема 1) в состав ФЭС входят только СБ (PV array) и преобразователь постоянного напряжения (DC-DC converter), работающий под управлением контроллера поиска точки MPPT. Достоинствами ФЭС данного типа является максимальная простота и низкая стоимость, очевидный недостаток – невысокая надежность электроснабжения потребителей. Областью практического применения таких станций являются системы отопления, приготовления пищи и перекачки воды, некритичные к параметрам питающего напряжения [8]. Основная функция системы управления такой ФЭС заключается в максимальном использовании доступной солнечной энергии без необходимости регулирования выходного напряжения и тока DC-DC-преобразователя.

Большее распространение получили автономные ФЭС с накопителями энергии, в качестве которых преимущественно используются аккумуляторные батареи (АБ). Применение АБ позволяет значительно повысить надежность ФЭС и обеспечить потребителей электроэнергией требуемого качества, однако стоимость ФЭС и сложность системы управления при этом возрастают. В зависимости от назначения на практике используются два основных вари-

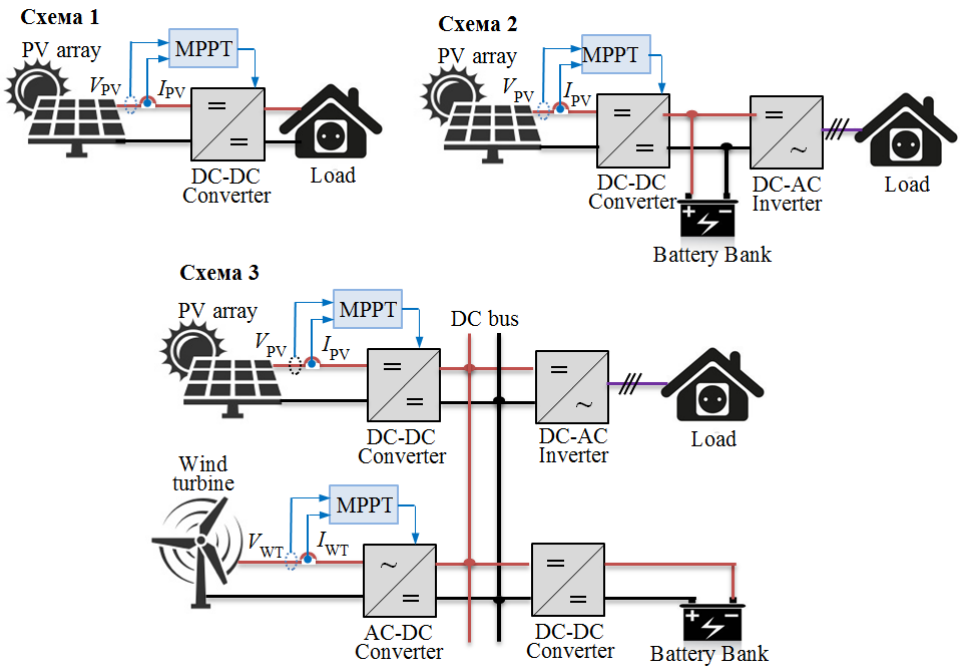


Рис. 1. Типовые структурные схемы построения автономных фотоэлектрических станций: Load – электрическая нагрузка; DC-AC Invertor – автономный инвертор напряжения; AC-DC Converter – преобразователь переменного напряжения в постоянное; Battery Bank – батарея аккумуляторов; DC bus – сборная шина постоянного тока; Wind turbine – ветротурбина

Fig. 1. Typical block diagram of stand-alone photovoltaic station construction: Load; DC-AC Invertor – stand-alone voltage inverter; AC-DC Converter; Battery Bank; DC bus; Wind turbine

анта построения автономных ФЭС с накопителями энергии: энергетические системы с единственным генерирующим источником (схема 2) и гибридные энергетические комплексы, в составе которых кроме ФЭС в качестве источников генерации используются и другие установки, например, ветроэнергетические (схема 3).

Отметим, что существуют и другие способы построения автономных ФЭС и гибридных энергетических систем [9, 10]. Выбор для анализа трех, представленных на рис. 1, топологий объясняется тем, что они отличаются друг от друга характером электрической нагрузки DC-DC-преобразователя, которая оказывает непосредственное влияние на его динамические характеристики, а, соответственно, и на выбор параметров всех основных элементов ФЭС. Для всех других, не рассматриваемых в данной работе топологий ФЭС, режимы работы DC-DC-преобразователя будут аналогичны одному из вышеобозначенных случаев.

Следует также отметить, что в составе автономных ФЭС применяются преобразователи напряжения различных типов, подробный обзор и сравнительный анализ которых представлены в работах [11, 12]. В данных исследованиях в качестве объекта анализа рассматриваются автономные ФЭС, построенные на базе понижающего DC-DC-преобразователя (buck converter), который преимущественно применяется в энергетических системах малой мощности. Также в данной работе не рассматриваются режимы частичного затенения СБ, особенно критичные для ФЭС большой мощности, требующие применения специализированных MPPT-контроллеров [12, 13].

Поставленные задачи исследований заключались в анализе статических и динамических характеристик DC-DC-преобразователя и MPPT-контроллера автономной ФЭС, а также разработке на основе полученных результатов практической методики выбора их оптимальных параметров.

3. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОМПОНЕНТОВ АВТОНОМНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Солнечная батарея. Для исследования режимов и характеристик СБ в данной работе использовалась математическая модель, построенная на основе эквивалентной электрической схемы замещения солнечного элемента с одним диодом, рис. 2 [14].

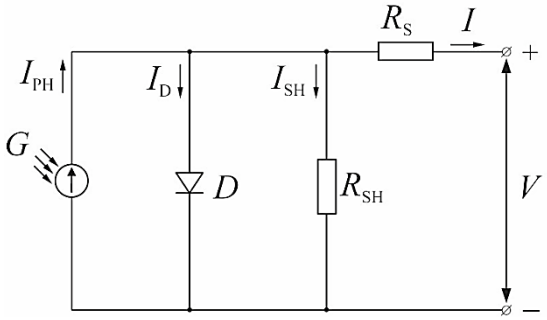


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения солнечного элемента
Fig. 2. Solar cell equivalent circuit

Идеализированная модель солнечного элемента (СЭ) состоит из источника тока, который создает фототок I_{PH}, и идеального диода *(D)*, величина тока I_D через который определяется уравнением Шокли и зависит от абсолютной температуры *(T)* и напряжения *(V)* на выходе СЭ.

С использованием общепринятых допущений фототок I_{PH} и обратный ток диода I_0 можно определить из следующих выражений:

$$I_{PH} = \left[I_{SC_STC} + k_I \cdot (T - T_{STC}) \right] \cdot G, \qquad (1)$$

где I_{SC_STC} – ток короткого замыкания фотоэлектрического преобразователя при стандартных условиях; k_I – температурный коэффициент тока короткого замыкания; T_{STC} – температура ячейки при стандартных условиях; G – величина солнечной радиации, Вт/м^2.

$$I_0 = \left[\frac{I_{SC_STC}}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{OC_STC}}{A \cdot k \cdot T_{STC}} \right) - 1} \right] \times \times \left(\frac{T}{T_{STC}} \right)^3 \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_G}{k \cdot A} \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (2)$$

где q = 1,602 · 10^{-19} Кл; k = 1,38 · 10^{-23} Дж/К – постоянная Больцмана; A – коэффициент идеальности диода (принимает значения от 1 до 5); E_G – ширина запрещенной энергетической зоны полупроводника (определяется типом используемого СЭ).

Для фотоэлектрического модуля (ФМ), состоящего из N_S последовательных и N_P, параллельно соединенных СЭ, уравнение вольтамперной характеристики имеет следующий вид:

$$I = N_P \cdot I_{PH} - N_P \cdot I_0 \times \times \left[\exp\left(\frac{q(V + I \cdot R_S)}{N_S \cdot A \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_S}{R_{SH}}, \quad (3)$$

где I, V – ток и напряжение на клеммах ФМ; R_S и R_{SH} – эквивалентные последовательное и шунтирующее сопротивления фотоэлектрического модуля, соответственно.

Уравнение (3) содержит пять неизвестных параметров (I_{PH}, I_0, A, R_S, R_{SH}), которые являются зависимыми от температуры поверхности ФМ и интенсивности солнечного излучения. В технической спецификации приводятся важные точки энергетических характеристик ФМ: ток короткого замыкания I_{SC}, аналитическое выражение для которого можно получить из (3), подставив в него V = 0; напряжение холостого хода V_{OC}, соответствующее величине напряжения на клеммах ФМ при разомкнутой внешней цепи (I = 0). Также приводятся параметры режима работы на нагрузку, соответствующей точке максимальной мощности (MPP) (от англ. maximum power point), при которой $I = I_{MPP}$, $V = V_{MPP}$.

Используя данные технической спецификации ФМ, можно получить численное решение уравнения (3) и построить динамическую математическую модель СБ. Для имитационного моделирования режимов ФЭС в качестве модели СБ использовался стандартный блок PV Array из библиотеки SimPowerSystems, построенный на основе уравнений (1)–(3).

Для выбора параметров DC-преобразователя необходимо установить рабочий диапазон его входного напряжения, который определяется значениями освещенности G и температуры T_{FM} фотоэлектрических модулей. На рис. 3 показано «семейство» вольт-ваттных характеристик (ВВХ) солнечной батареи, состоящее из трех последовательно соединенных ФМ Kyocera Solar KD320GX-LPB (поликристаллический модуль от Kyocera сочетает в себе высочайшую энергоэффективность с завидной номинальной мощностью и стильным дизайном, поэтому он является несомненным лидером продаж вот уже несколько лет), построенных по результатам имитационного моделирования. Характеристики построены при дискретно заданных значениях G = 100, 400, 700, 1000 Вт/м^2 и T_{FM} = –25, 0, 25, 50ºС, что соответствует диапазону изменения внешних климатических условий, при которых возможна выработка электричекой энергии ФЭС. Выделенная на рис. 3 заштрихованная область определяет рабочий диапазон входных напряжений DC-преобразователя и его мощность.

Задачу определения рабочего диапазона входных напряжений и номинальную мощность DC-преобразователя ФЭС можно значительно упростить, решив ее аналитическим путем, используя данные технической спецификации ФМ, а также приняв допущения, что при изменении внешних климатических условий величина напряжения в MPP изменяется пропорционально напряжению холостого хода, а ток в MPP изменяется пропорционально фототоку. Тогда для определения V_{MPP} и I_{MPP} при произвольных значениях G и T_{FM} можно использовать следующие уравнения [14, 15]:

$$I_{MPP} = \left[I_{MPP_STC} + k_I \cdot \left(T_{FM} - T_{STC} \right) \right] \cdot N_{FMp} \cdot \frac{G}{G_{STC}}; \quad (4)$$

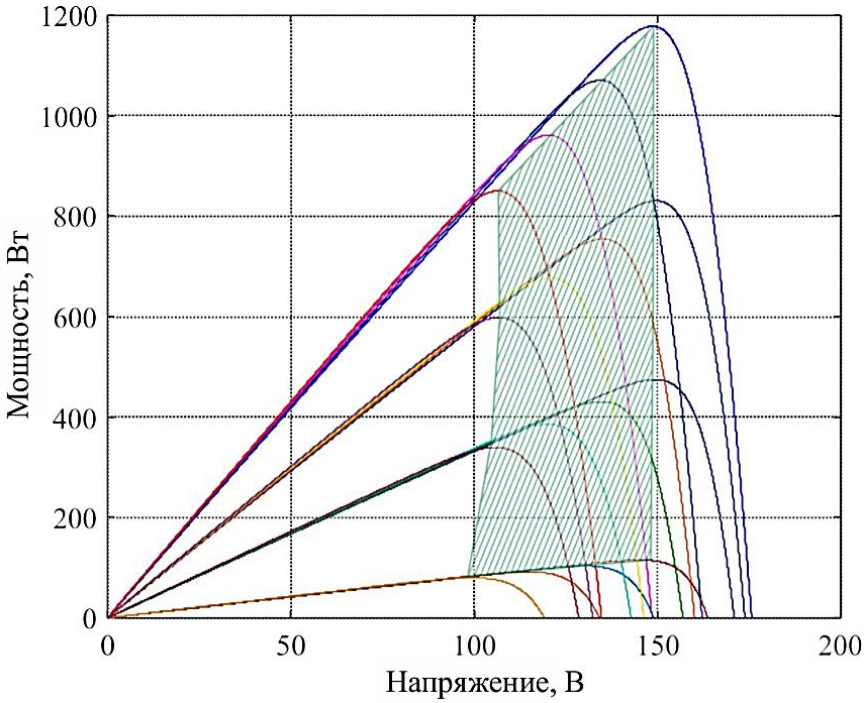


Рис. 3. Вольт-ваттные характеристики солнечной батареи
Fig. 3. Solar battery Volt-Watt characteristics

$$V_{\text{MPP}} = \left[V_{\text{MPP_STC}} + k_V \cdot \left(T_{\text{FM}} - T_{\text{STC}}\right)\right] \times \\ \times N_{\text{FMs}} - \left[\left(I_{\text{MPP_STC}} - I_{\text{MPP}}\right) \cdot R_S\right] \cdot \frac{N_{\text{FMs}}}{N_{\text{FMp}}}, \quad (5)$$

где $V_{\text{MPP_STC}}$ и $I_{\text{MPP_STC}}$ – напряжение и ток в MPP при стандартных условиях тестирования (G_{STC} = 1000 Вт/м^2, T_{STC} = 25ºC); N_{FMs} и N_{FMp} – число последовательно и параллельно соединенных ФМ в СБ, соответственно; R_S – последовательное сопротивление ФМ.

Величина R_S определяется по выражению [14]:

$$R_S = \frac{\frac{N_S \cdot A \cdot k \cdot T_{\text{STC}}}{q} \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{\text{MPP_STC}}}{I_{\text{SC_STC}}}\right) + V_{\text{OC_STC}} - V_{\text{MPP_STC}}}{I_{\text{MPP_STC}}}, \quad (6)$$

где N_S – число последовательных солнечных элементов в ФМ.

Предложенный выше упрощенный подход определения параметров режима MPP СБ при очевидной простоте применения обеспечивает достаточно высокую точность. Сравнение результатов расчета значений напряжения и тока в MPP СБ, полученных по уравнениям (4)–(6), с результатами имитационного моделирования характеристик СБ, полученных численным решением уравнений (1)–(3), показывает, что максимальная погрешность в определении V_{MPP} и I_{MPP} во всем практическом диапазоне изменения G и T_{FM} составляет не более 4%.

Преобразователь напряжения. Принципиальная электрическая схема понижающего преобразователя напряжения приведена на рис. 4.

Основными элементами преобразователя являются входной емкостной фильтр C_{in}, транзисторный ключ *VT*, выходной сглаживающий фильтр *LC*-типа на элементах *L* и C_{out} , а также разрядный диод *VD*. Источником питания преобразователя является СБ, на выходные клеммы подключено сопротивление R_{out}, имитирующее полезную нагрузку ФЭС. Сигнал управления транзисторным ключом подается с генератора широтно-импульсной модуляции (PWM) (от англ. pulse width modulation) и формируется на основе значений коэффициента заполнения *d*, вычисляемого MPPT-контроллером.

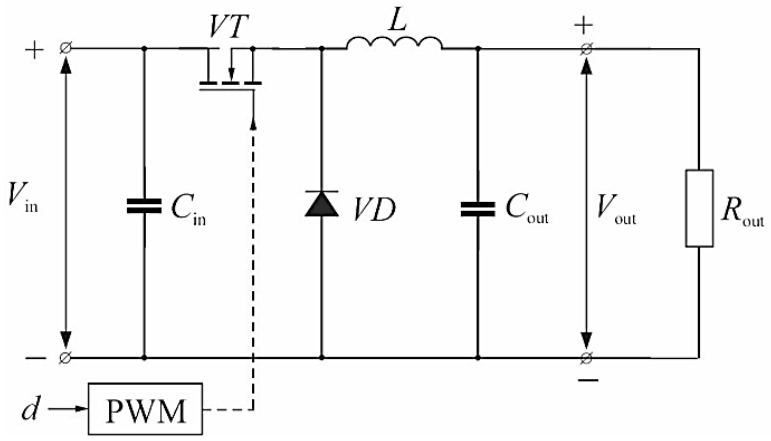


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема понижающего преобразователя
Fig. 4. Schematic diagram of a buck converter

В большинстве практических случаев преобразователь ФЭС проектируется для работы в режиме непрерывных токов (CCM) (от англ. continuous current mode), что обеспечивает его лучшую управляемость и минимизацию потерь энергии. Временные диаграммы идеального преобразователя для режима неразрывного тока дросселя приведены на рис. 5.

Если пренебречь пульсациями выходного напряжения, из рис. 5 можно выразить величину пульсаций тока индуктора:

$$\Delta i_L = I_{L(\max)} - I_{L(\min)} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} \cdot t_{on} = \\ = \frac{V_{out}}{L \cdot f} \cdot \left(1 - \frac{V_{out}}{V_{in}}\right) = \frac{V_{out} \cdot (1-d)}{L \cdot f}, \quad (7)$$

где t_{on} – интервал времени проводящего состояния транзистора; t_{off} – интервал времени паузы; $T_0 = 1/f$ – период широтно-модулированных импульсов; f – частота коммутации; $d = t_{on}/T_0 = V_{out}/V_{in}$ – коэффициент заполнения или относительная длительность импульсов.

Для сохранения CCM вплоть до минимального тока нагрузки должно выполняться следующее условие: $\Delta i_L = 2 \cdot I_{out(min)}$. Выполнение данного условия обеспечит режим неразрывного тока, однако большая величина пульсаций негативно влияет на насыщение сердечника дросселя и качество выходного напряжения преобразователя. Поэтому на практике величину пульсаций тока ограничивают выбором соответствующего коэффициента пульсаций $k_{\Delta i} = \Delta i_L / I_{out}$, значение которого обычно принимают в пределах 20–50%. Тогда с учетом (7) получаем условие для выбора L:

$$L \geq \frac{V_{out}}{k_{\Delta i} \cdot f \cdot I_{out(min)}} \cdot \left(1 - \frac{V_{out}}{V_{in}}\right) = \frac{R_{out(max)} \cdot (1-d)}{k_{\Delta i} \cdot f}. \quad (8)$$

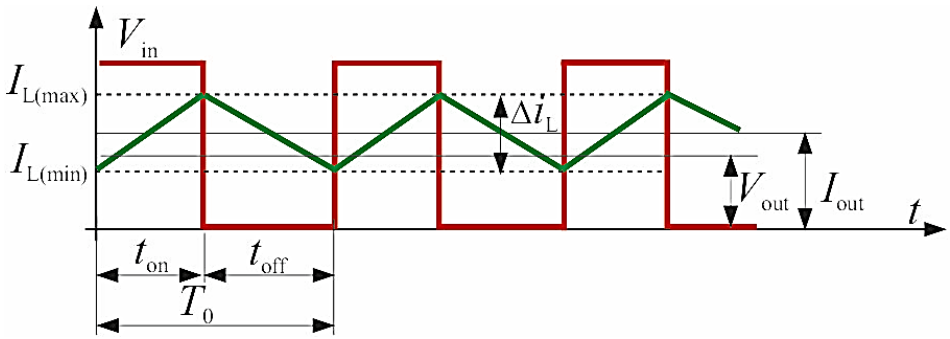


Рис. 5. Временные диаграммы понижающего преобразователя для режима неразрывного тока дросселя
Fig. 5. Timing diagrams of a buck converter for the inductor continuous current mode

Величину пульсаций выходного напряжения преобразователя можно определить, приняв допущение, что переменная составляющая тока замыкается только через конденсатор фильтра C_{out} [16]. С учетом того, что максимальные пульсации тока соответствуют режиму d = 0,5, из рис. 5 можно выразить изменение заряда на выходном конденсаторе:

$$\Delta Q = \frac{1}{2}\cdot\left(\frac{T_0}{2}\right)\cdot\left(\frac{\Delta i_L}{2}\right) = \frac{\Delta i_L}{8\cdot f}. \quad (9)$$

Принимая во внимание, что пульсации напряжения и изменение заряда емкости связываются соотношением $\Delta V = \Delta Q/C$ из (7) и (9), выразим условие для выбора конденсатора фильтра:

$$C_{\text{out}} \geq \frac{V_{\text{out}}\cdot(1-d)}{8\cdot L\cdot f^2\cdot\Delta V_{\text{out}}} = \frac{(1-d)}{8\cdot L\cdot f^2\cdot k_{\Delta V\text{out}}}, \quad (10)$$

где $k_{\Delta V\text{out}} = \Delta V_{\text{out}}/V_{\text{out}}$ – допустимый коэффициент пульсаций выходного напряжения, величина которого определяется требованиями нагрузки (обычно 1–5%).

Обязательным элементом преобразователя ФЭС является входной конденсатор C_{in}, обеспечивающий сглаживание пульсаций напряжения СБ, обусловленных нелинейностью ее характеристик. Выбор емкости конденсатора C_{in} производится из условия ограничения величины пульсаций входного напряжения преобразователя до значений не более $k_{\Delta V\text{in}}$ = 1%, что обеспечит максимально эффективное использование энергии, генерируемой СБ [17]. С учетом (7), (9), (10) условие выбора входного конденсатора понижающего преобразователя напряжения можно представить в виде выражения:

$$C_{\text{in}} \geq \frac{V_{\text{in}}\cdot d\cdot(1-d)}{8\cdot L\cdot f^2\cdot\Delta V_{\text{in}}} = \frac{1}{32\cdot k_{\Delta V\text{in}}\cdot L\cdot f^2}. \quad (11)$$

Важнейшей задачей проектирования преобразователей напряжения является расчет и анализ их динамических характеристик. Импульсные преобразователи напряжения относятся к нелинейным дискретным системам автоматического регулирования, для определения динамических характеристик которых широкое распространение получили методы анализа на основе приближенных усредненных моделей преобразовательных устройств [18]. Передаточные функции понижающего DC-DC-преобразователя по управляющему воздействию, полученные из линеаризованной усредненной модели [19], будут записаны в следующем виде:

$$W_{\Delta d}^{\Delta V_{\text{out}}}(s) = \frac{V_{\text{in}}}{L\cdot C_{\text{out}}}\cdot\frac{1}{s^2+\frac{s}{R_{\text{out}}\cdot C_{\text{out}}}+\frac{1}{L\cdot C_{\text{out}}}};$$
$$W_{\Delta d}^{\Delta I_{\text{out}}}(s) = \frac{V_{\text{in}}}{L}\cdot\frac{s+\frac{1}{R_{\text{out}}\cdot C_{\text{out}}}}{s^2+\frac{s}{R_{\text{out}}\cdot C_{\text{out}}}+\frac{1}{L\cdot C_{\text{out}}}}. \quad (12)$$

Уравнения (12) описывают отклик выходного напряжения и тока преобразователя на изменение (отклонения относительно точки линеаризации) управляющего параметра – значения коэффициента заполнения d. Полученные уравнения (12) позволяют выполнить анализ частотных характеристик преобразователя и синтезировать систему управления, построенную на базе традиционных аналоговых регуляторов.

Нагрузка преобразователя. Характер нагрузки преобразователя напряжения ФЭС определяется схемой построения электростанции. Для ФЭС, построенной по схеме 1 (см. рис. 1), режимы работы DC-DC-преобразователя можно считать эквивалентными режимам работы на нагрузку с неизменным активным сопротивлением, в схеме 2 нагрузкой преобразователя является АБ, в схеме 3 DC-DC-преобразователь нагружен на сборную шину постоянного тока,

При построении имитационной модели ФЭС нагрузка преобразователя моделировалась в виде отдельного функционального блока (рис. 6), что позволяет легко изменять конфигурацию исследуемой системы.

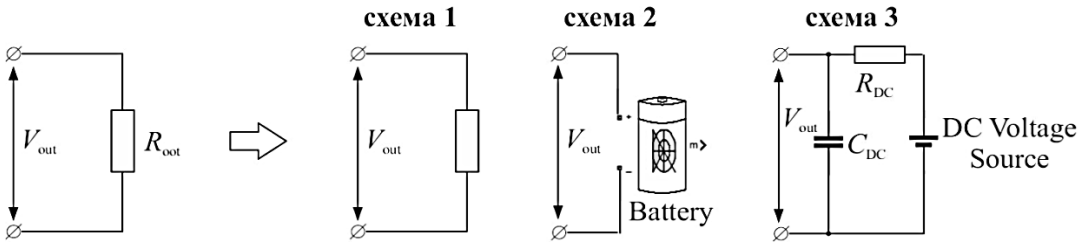


Рис. 6. Функциональные блоки нагрузки преобразователя напряжения имитационной модели фотоэлектрической станции
Fig. 6. Functional load blocks of the voltage inverter of the photovoltaic station simulation model

В качестве динамической модели АБ использовался стандартный блок Battery из библиотеки SimPowerSystems, модель шины постоянного тока построена на базе конденсатора C_{DC} и источника постоянного напряжения (DC Voltage Source) с внутренним сопротивлением R_{DC}.

Контроллер максимальной мощности. В зависимости от аппаратного исполнения различают два основных вида MPPT-контроллеров: аналоговые и цифровые. В аналоговых контроллерах управляющий сигнал формируется в виде опорного напряжения, которое сравнивается с выходным напряжением преобразователя, далее сигнал рассогласования отрабатывается традиционной системой управления, построенной на базе пропорционально-интегрального регулятора [20]. В цифровых контроллерах выходным сигналом является коэффициент заполнения d (duty cycle), который через генератор PWM подается непосредственно на транзисторные ключи преобразователя. Благодаря простоте реализации и высокой надежности, именно цифровые контроллеры MPP преимущественно применяются в современных ФЭС [21]. При использовании цифровых контроллеров величина d дискретно изменяется на величину Δd через определенное время выборки t_s (sample time), численные значения которых оказывают непосредственное влияние на точность и скорость отслеживания MPP при изменении освещенности и температуры СБ. Соответственно, основной задачей проектирования цифровых MPPT-контроллеров является определение оптимальных значений Δd и t_s, обеспечивающих максимальную точность и быстродействие отслеживания MPP.

В настоящей работе рассматривается цифровой MPPT-контроллер, реализующий алгоритм приращения проводимости (IC) (от англ. Incremental Conductance). Принцип действия алгоритма IC основан на равенстве мгновенной проводимости СБ и производной проводимости в точке максимальной мощности [15].

Математические соотношения, поясняющие работу алгоритма IC, можно легко получить, продифференцировав мощность P солнечной батареи по напряжению V с учетом того, что производная в точке максимальной мощности обращается в нуль:

$$\begin{aligned} dP/dV &= d(V\cdot I)/dV = \\ &= I + V(dI/dV) = 0. \end{aligned} \qquad (13)$$

Уравнение (13) можно представить в виде

$$dI/dV = -I/V. \qquad (14)$$

Из выражения (14) вытекают два важных соотношения, которые позволяют определить положение рабочей точки СБ на ее ВВХ относительно точки максимальной мощности:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad \left(\frac{dP}{dV} > 0\right) - \\ &\text{рабочая точка слева от MPP;} \\ &\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad \left(\frac{dP}{dV} > 0\right) - \\ &\text{рабочая точка справа от MPP.} \end{aligned}\right\} \qquad (15)$$

С учетом соотношений (15) работа алгоритма IC может быть представлена в виде блок-схемы, изображенной на рис. 7. В имитационной модели ФЭС модель алгоритма IC реализована в виде программного кода, записанного в отдельном файле-функции.

Основной задачей проектирования цифровых MPPT-контроллеров является определение тактовой частоты f_d изменения рабочего цикла *d*-преобразователя. Выбор величины f_d целесообразно производить из условия устойчивой работы системы управления, которое обеспечивается, если за время $t_s = 1/f_d$ будет заканчиваться переходный процесс в преобразователе, вызванный изменением управляющего воздействия или внешних условий.

Постоянную времени понижающего DC-DC-преобразователя τ приближенно можно найти из уравнения:

$$\tau = \frac{L}{R_{out}}. \quad (16)$$

С учетом того, что длительность любого переходного процесса составляет до $5 \cdot \tau$, для определения оптимальной величины t_s рекомендуется использовать выражение:

$$t_s \geq 5 \cdot \tau. \quad (17)$$

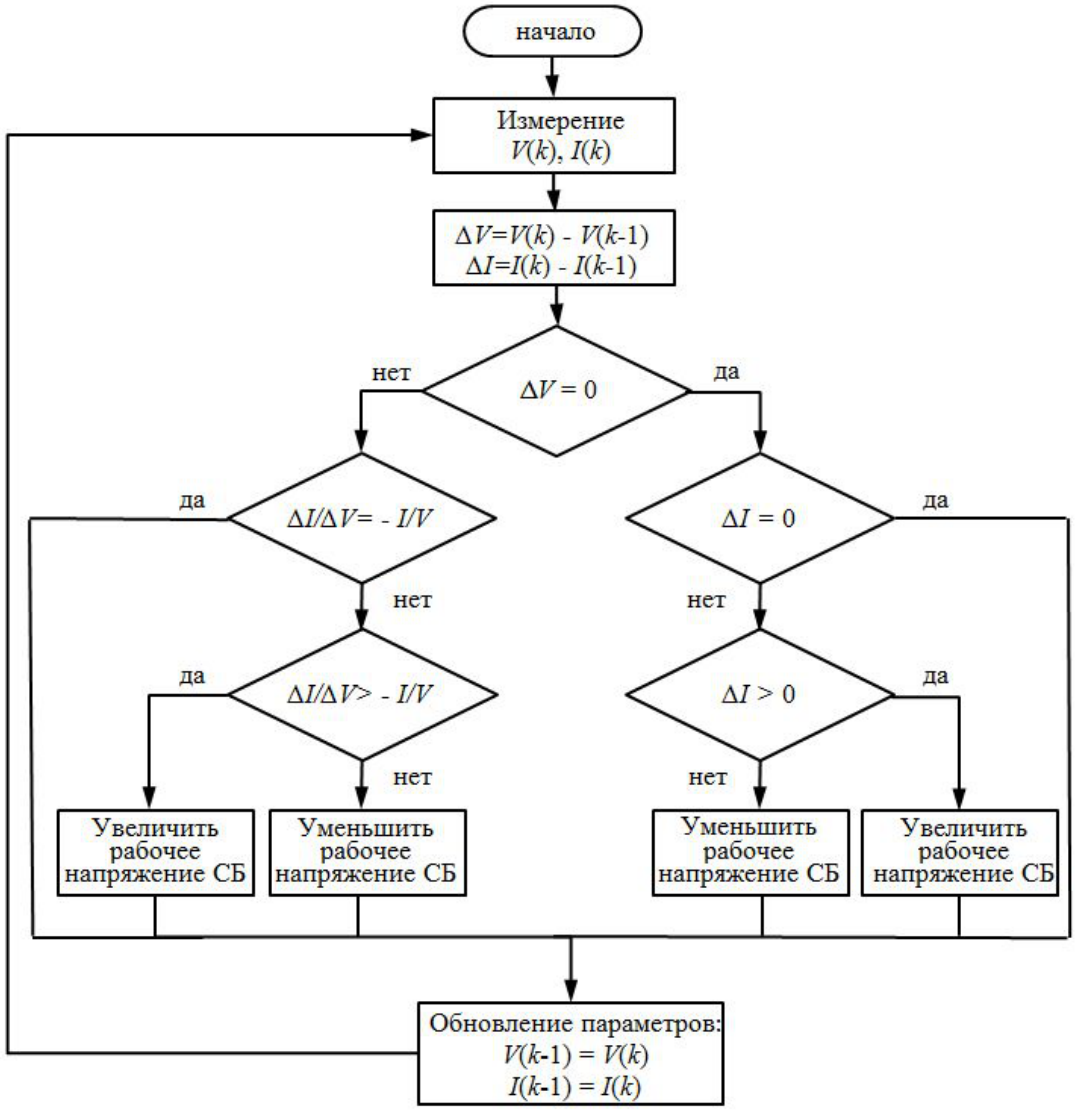


Рис. 7. Блок-схема алгоритма приращения проводимости
Fig. 7. Flowchart for the incremental conductance algorithm

Выбор значения t_s по условию (17) обеспечит максимальное быстродействие MPPT-контроллера и в то же время устойчивую работу в MPP.

При определении параметров MPPT-контроллера необходимо учитывать характер нагрузки DC-DC-преобразователя. Для ФЭС, построенной по схеме 1, величина эквивалентной электрической нагрузки однозначно определяется данным выражением:

$$R_{out} = R_{load}. \quad (18)$$

В ФЭС, построенных по схемам 2 и 3, напряжение на выходе преобразователя является стабилизированным. Пренебрегая изменением напряжения на зажимах АБ от величины ее заряда и без учета статизма DC-шины, величину эквивалентного сопротивления DC-DC-преобразователя можно определить через выходную мощность. Для идеального преобразователя со стабилизированным выходным напряжением величина эквивалентного выходного сопротивления определяется по формулам:

$$R_{out(min)} = \frac{V_{out}^2}{P_{MPP(max)}}; \quad R_{out(max)} = \frac{V_{out}^2}{P_{MPP(min)}}, \quad (19)$$

где $P_{MPP(max)}$, $P_{MPP(min)}$ – значения максимальной и минимальной мощностей, генерируемых СБ.

Так как постоянная времени преобразователя обратно пропорциональна величине R_{out}, в уравнение (16) необходимо подставить минимальное значение эквивалентного сопротивления, определенного по (19).

Важным параметром цифрового MPPT-контроллера является величина изменения рабочего цикла преобразователя Δd за время выборки t_s. Большая величина Δd сокращает время поиска MPP, однако это снижает точность отслеживания, а также может привести к колебательному режиму около MPP. Приближенно можно считать, что величина шага изменения выходной мощности СБ ΔP линейно зависит от величины Δd. При данном допущении для определения оптимальной величины Δd можно использовать уравнение:

$$\Delta d = \frac{\varepsilon}{100} \cdot (d_{max} - d_{min}), \quad (20)$$

где ε – допустимая относительная ошибка (%); d_{min}, d_{max} – минимальное и максимальное значения коэффициента заполнения, соответственно.

Результаты проведенных исследований показали, что хороший компромисс между скоростью и точностью отслеживания MPP обеспечивает величина ε = 1%, которая и использовалась при проведении вычислительных экспериментов.

4. УСЛОВИЯ СОГЛАСОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

Уравнения (1)–(3) определяют вид ВАХ СБ, которые зависят от уровня освещенности G и температуры поверхности T. На рис. 8 показаны ВАХ СБ для разных уровней солнечной радиации и температуры. На каждой из ВАХ существует единственная точка (на рис. 8 обозначена как A и B), соответствующая определенным значениям тока I_{MPP} и напряжения V_{MPP}, при которых СБ будет вырабатывать максимальную мощность P_{MPP}. Данные значения напряжения и тока определяют величину эквивалентного сопротивления СБ в точке максимальной мощности:

$$R_{MPP} = \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}}. \quad (21)$$

Максимальный отбор мощности с СБ обеспечивается при равенстве эквивалентного выходного сопротивления СБ в MPP R_{MPP} и эквивалентного входного сопротивления преобразователя R_{in}. Величина R_{in} зависит от топологии преобразователя, его нагрузки R_{out} и величины коэффи-

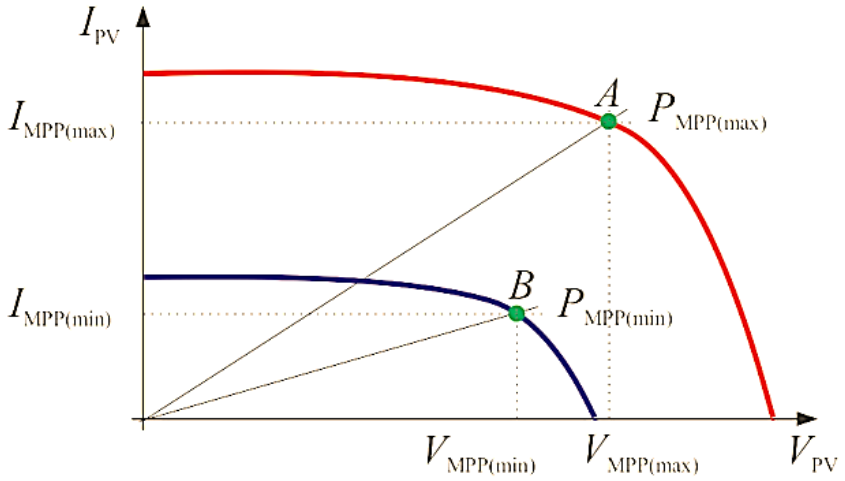


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики солнечной батареи при разных уровнях освещенности и температуры
Fig. 8. Current-voltage characteristics of the PV panel under different solar irradiation and temperature conditions

циента заполнения *d* (duty cycle). При поиске MPPT-контроллер изменяет величину *d* таким образом, чтобы выполнялось условие: $R_{MPP} = R_{in}$. Если пренебречь потерями в понижающем DC-преобразователе, из условия равенства его входной и выходной мощности выводится важное практическое соотношение:

$$\frac{V_{MPP}^2}{R_{MPP}} = \frac{V_{out}^2}{R_{out}} = \frac{(V_{MPP} \cdot d)^2}{R_{out}} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{R_{out}}{R_{MPP}}}. \quad (22)$$

Так как величина *d* не может быть больше 1, из (22) следует, что величина выходного сопротивления понижающего преобразователя должна быть меньше минимального эквивалентного сопротивления СБ в MPP для обеспечения работы СБ в MPP во всех возможных эксплуатационных режимах:

$$R_{out} < R_{MPP(min)}. \quad (23)$$

При проектировании преобразователя для ФЭС, построенных по схемам 2 и 3, данное условие трансформируется в выбор рациональной величины номинального выходного напряжения преобразователя по условию, где

$$V_{out} < V_{MPP(min)}. \quad (24)$$

Характерной особенностью СБ является прямая зависимость I_{MPP} и обратная зависимость V_{MPP} от температуры поверхности ФМ, при этом температурный коэффициент напряжения k_V по абсолютной величине намного превышает температурный коэффициент по току k_I. Анализ ВВХ СБ (см. рис. 3) показывает, что для проектирования преобразователя ФЭС необходимо определить значения тока и напряжения в MPP для четырех узловых точек при различных сочетаниях *G* и *T*. Характеристики узловых точек СБ и соответствующие им показатели режима приведены в табл. 1.

Минимальные и максимальные значения *G* и *T* определяются в соответствии с месторасположением и условиями эксплуатации ФЭС. В настоящих исследованиях использовались следующие диапазоны изменения радиации и температуры, характерные для условий эксплуатации ФЭС в северных широтах: G_{min} = 100 Вт/м^2, G_{max} = 1000 Вт/м^2, T_{min} = – 25ºС, T_{max} = +50ºС.

Значения токов, напряжений и мощности в узловых точках СБ легко определяются по уравнениям (4)–(6), значения эквивалентных сопротивлений рассчитываются по уравнению (21), для определения предельных значений рабочего цикла *d*-преобразователя используется уравнение (22).

Таблица 1

Узловые точки солнечной батареи фотоэлектрической станции

Table 1

Key points of a photovoltaic station solar cell

Солнечная радиация G, Вт/м^2	Температура поверхности T, ºС	Показатели	Режим
min	min	$R_{MPP(max)}$, $I_{MPP(min)}$	максимального сопротивления
min	max	$P_{MPP(min)}$, $V_{MPP(min)}$	минимальной мощности
max	min	$P_{MPP(max)}$, $V_{MPP(max)}$	максимальной мощности
max	max	$R_{MPP(min)}$, $I_{MPP(max)}$	минимального сопротивления

5. МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

На основании анализа энергетических характеристик основных элементов ФЭС разработана методика расчета и выбора их оптимальных параметров, представленная в виде блок-схемы, изображенной на рис. 9.

При использовании предлагаемой методики необходимо учитывать особенности режимов работы DC-DC-преобразователя на нагрузку различного характера. Данная особенность состоит в том, что при работе на нагрузку в виде неизменного сопротивления (схема 1) увеличение значений d приводит к увеличению выходной мощности преобразователя, тогда как в энергетических системах со стабилизированным выходным напряжением

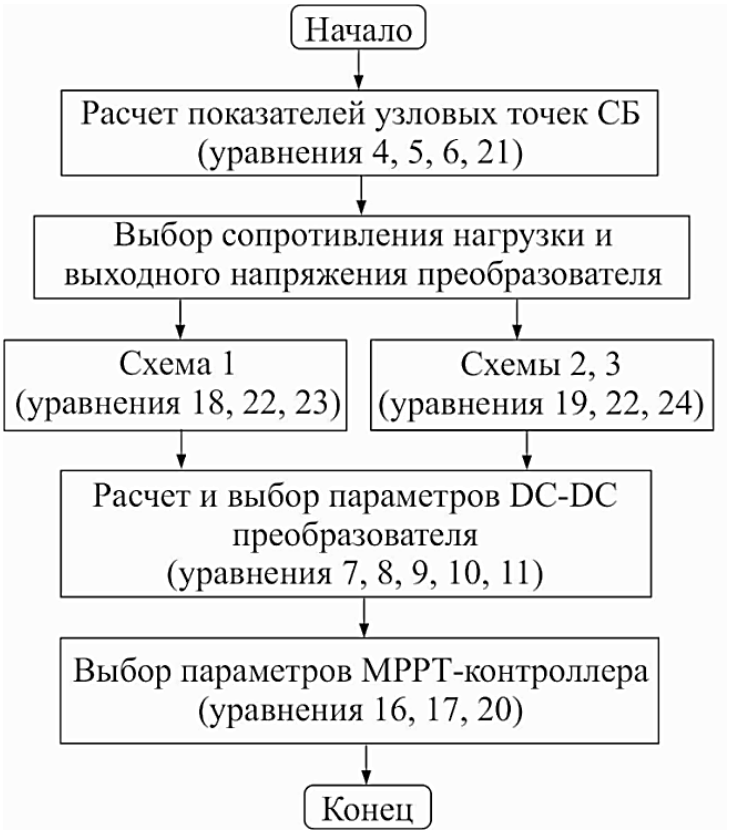


Рис. 9. Блок-схема расчета и выбора оптимальных параметров основных элементов автономной фотоэлектрической станции
Fig. 9. Flowchart for calculating and selecting optimal parameters of the main elements of a stand-alone photovoltaic station

преобразователя (схемы 2, 3) увеличение d вызывает снижение выходной мощности. Соответственно, при расчете параметров DC-DC-преобразователя для схемы 1 в уравнениях (8) и (10) нужно использовать минимальное значение коэффициента заполнения d_{min}, для схем 2 и 3 в уравнении (8) необходимо использовать d_{max}, а в уравнении (10) – d_{min}.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для апробации предлагаемой методики был рассмотрен практический пример расчета и выбора параметров DC-DC-преобразователя и цифрового MPPT-контроллера автономной ФЭС, построенной на основе СБ, состоящей из трех последовательно соединенных ФМ Kyocera Solar KD320GX-LPB, основные технические характеристики которых приведены в табл. 2.

Для полноты анализа были рассмотрены три возможных варианта построения автономных ФЭС: схемы 1–3. Для каждой схемы были разработаны и реализованы в программном комплексе имитационные модели ФЭС на основе математических моделей компонентов, представленных выше. Для повышения достоверности полученных результатов и оценки эффективности преобразования энергии в имитационной модели ФЭС учтены неидеальности элементов преобразователя – активное сопротивление дросселя и эквивалентное внутреннее сопротивление конденсаторов, а также статические характеристики транзистора и диода – падение напряжения и сопротивление в проводящем состоянии.

Параметры DC-DC-преобразователя и MPPT-контроллера были рассчитаны и выбраны по предлагаемой методике в соответствии с блок-схемой, изображенной на рис. 9. В имитационной модели ФЭС для схемы 2 в качестве накопителя энергии принята свинцово-кислотная АБ номинальной емкостью 200 А·ч, модель DC-шины в схеме 3 построена на основе конденсатора емкостью 300 мкФ и активного сопротивления номиналом 0,01 Ом. Частота генератора PWM (f) во всех вычислительных экспериментах принята равной 25 кГц.

Параметры DC-DC-преобразователя и MPPT-контроллера, выбранные в результате расчета по предлагаемой методике, приведены в табл. 3.

Полученные результаты расчета показывают, что инерционность DC-DC-преобразователя, предназначенного для работы в составе автономных ФЭС, построенных по схемам 2 и 3, на порядок выше, чем у аналогичного преобразователя,

Таблица 2

Данные технической спецификации фотоэлектрического модуля Kyocera Solar KD320GX-LPB при стандартных условиях тестирования

Table 2

Technical specification data of the Kyocera Solar KD320GX-LPB PV module under standard test conditions

Параметр	Значение
Напряжение холостого хода, V_{OC}, В	49,5
Ток короткого замыкания, I_{SC}, А	8,6
Напряжение в точке максимальной мощности, V_{MPP}, В	40,1
Ток в точке максимальной мощности, I_{MPP}, А	7,99
Мощность в точке максимальной мощности, P_{MPP}, Вт	320,4
Температурный коэффициент напряжения V_{OC}, k_V, В/ºС	-0,1832
Температурный коэффициент I_{SC}, k_I, А/ºС	0,00328
Количество последовательных ячеек, N_S	80

Таблица 3

Результаты расчета и выбора параметров основных компонентов автономной фотоэлектрической станции

Table 3

Results of parameter calculating and selecting for stand-alone photovoltaic station main components

Параметр	Значение	
	Схема 1	Схемы 2, 3
R_s, Ом	0,487	0,487
R_{out}, Ом	10	–
V_{out}, В	–	48
d_{min}	0,24	0,33
d_{max}	0,87	0,50
L, мкГн	800	1500
C_{out}, мкФ	20	10
C_{in}, мкФ	20	10
t_s, с	0,0004	0,004
Δd	0,005	0,0015

работающего на активную нагрузку. Кроме того, из табл. 3 очевидно, что у DC-DC-преобразователя со стабилизированным выходным напряжением значительно сужается рабочий диапазон изменения рабочего цикла, что обусловливает высокую жесткость его регулировочных характеристик, и, соответственно, повышает требования к точности и качеству регулирования системы управления.

На рис. 10 приведены результаты моделирования рабочих режимов ФЭС при внезапном изменении условий освещения СБ для схем 1 и 2 (результаты для схемы 3 не приводятся, так как они практически идентичны схеме 2). При проведении данного вычислительного эксперимента условия освещенности СБ изменяются через 0,05 с модельного времени и соответствуют следующим последовательным значениям солнечной радиации: G = 800; 400; 200; 600; 1000 Вт/м^2. Температура поверхности ФМ принята неизменной – +25ºС.

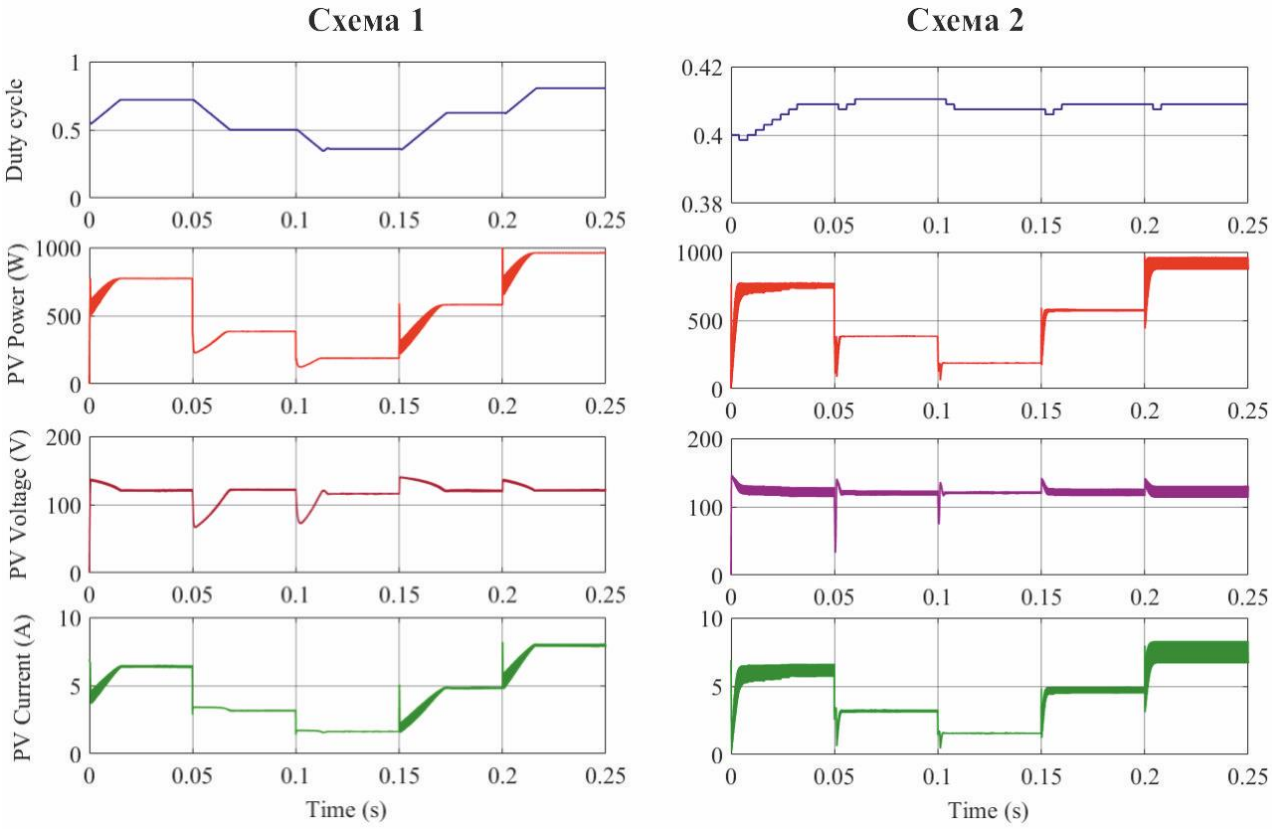


Рис. 10. Результаты моделирования режимов фотоэлектрической станции при изменении условий освещения солнечных батарей

Fig. 10. Simulation results of photovoltaic station modes under solar cell lighting condition variation

При проведении вычислительных экспериментов фиксировались значения коэффициента заполнения *d* (duty cycle), выходной мощности (PV Power), напряжения (PV Voltage) и тока (PV Current) солнечных батарей, а также параметры электрической энергии, потребляемой нагрузкой.

Результаты моделирования, представленные на рис. 10, доказывают, что DC-DC-преобразователь и MPPT-контроллер с выбранными значениями параметров обеспечивают надежное и эффективное отслеживание MPP во всех 5 тестовых вариантах изменения освещенности. Точность отслеживания точки максимальной мощности в схеме 1 составляет не менее 99,6%, в схеме 2 – не менее 98,2%, а коэффициент полезного действия DC-DC-преобразователя во всех рассмотренных режимах не опускался ниже 93,2%. Рабочие диапазоны изменения энергетических характеристик основных элементов ФЭС (ток, напряжение, мощность) соответствуют расчетным значениям, полученным при их проектировании.

Интересная особенность динамических режимов автономной ФЭС состоит в следующем: несмотря на то, что схема 2 имеет гораздо большую инерционность, чем схема 1, переходные процессы в ней, вызванные внезапным изменением освещенности СБ, заканчиваются намного быстрее. Объясняется это тем, что изменение величины солнечной радиации незначительно влияет на напряжение в MPP СБ (см. рис. 3), и в схемах со стабилизированным выходным напряжением преобразователя величина коэффициента заполнения *d* остается практически неизменной, что обеспечивает быстрое окончание переходного процесса. Гораздо сильнее величина *d* зависит от температуры поверхности фотоэлектрических модулей, которая не может изменяться мгновенно или с высоким градиентом, соизмеримым с постоянной времени DC-преобразователя, и данная зависимость не является критичной. При работе DC-DC-преобразователя на активное сопротивление величина его выходного напряжения изменяется пропорционально напряжению питания, что требует изменения в достаточно широких пределах величины *d*. При правильно выбранных параметрах преобразователя и MPPT-контроллера время отслеживания MPP не превышает 0,03 с, что очевидно из рис. 10.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена оригинальная методика расчета и выбора оптимальных параметров основных элементов автономной ФЭС: понижающего DC-DC-преобразователя и MPPT-контроллера. Параметры преобразователя выбираются на основе расчета и анализа возможного диапазона изменения напряжения в точке максимальной мощности при различных условиях освещения и температуры. Параметры цифрового MPPT-контроллера выбираются на основе расчетного значения постоянной времени преобразователя и характера его электрической нагрузки. В работе рассмотрены три основных варианта построения автономных ФЭС, для каждого из которых установлены особенности проектирования. Предлагаемая методика апробирована на конкретном примере, ее адекватность подтверждена результатами имитационного моделирования динамических режимов автономной ФЭС для всех трех рассмотренных топологий.

Библиографический список

1. Jäger-Waldau A. PV Status Report 2018. Luxembourg: Office of the European Union, 2018. 88 p. http://dx.doi.org/10.2760/826496

2. О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности // Официальный интернет-портал правовой информации [Электронный ресурс]. URL: http://www.pravo.gov.ru (26.09.2019).

3. О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам стимулирования использования возобновляемых источников энергии на розничных рынках электрической энергии // Официальный интернет-портал пра-

вовой информации [Электронный ресурс]. URL: http://www.pravo.gov.ru (30.09.2019).
4. План мероприятий по стимулированию развития генерирующих объектов на основе возобновляемых источников энергии с установленной мощностью до 15 кВт [Электронный ресурс]. URL: http://static.government.ru/media/files/D7T1wAHJ0E8vEWst5MYzr5DOnhHFA3To.pdf (30.09.2019).
5. Единая энергетическая система России: промежуточные итоги (оперативные данные) 2018 г. // Системный Оператор Единой Энергетической Системы. Информационный обзор [Электронный ресурс]. URL: https://so-ups.ru/fileadmin/files/ company/reports/ups-review/2018/ups_review_0218.pdf (30.09.2019).
6. Четти П.П.К. Проектирование ключевых источников электропитания / пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1990. 238 с.
7. Мэк Р. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению. Серия: Силовая электроника / пер. с англ. М.: Изд. дом «Додэка-XXI», 2008. 272 с.
8. Nayak B., Mohapatra A., Mohanty K.B. Selection criteria of DC-DC converter and control variable for MPPT of PV system utilized in heating and cooking applications // Electrical & Electronic Engineering. 2017. Vol. 4. P. 1–16. https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1363357
9. Khatib T., Ibrahim I.A., Mohamed A. A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a stand-alone photovoltaic system // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 120. P. 430–448. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.011
10. Chauhan A., Saini R.P. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 38. P. 99–120. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.079
11. Asim A., Amir A., Che Hang Seng, Elkhateb A., Rahim N.A Comparative analysis of high voltage gain DC-DC converter topologies for photovoltaic systems // Renewable Energy. 2019. Vol. 136. P. 1147–1163. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.089
12. Rezk H., Fathy A., Abdelaziz A.Y. A comparison of different global MPPT tecniques based on meta-heuristic algorithms for photovoltaic system subjected to partial shading conditions // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 74. P. 377–386. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.051
13. Ibrahim A., Aboelsaud R., Obukhov S. Improved particle swarm optimization for global maximum power point tracking of partially shaded PV array // Electrical Engineering. 2019. Vol. 101. P. 443–455. https://doi.org/10.1007/s00202-019-00794-w
14. Обухов С.Г., Плотников И.А. Модель солнечной панели в MATLAB SIMULINK // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 21. С. 51–59.
15. Обухов С.Г., Плотников И.А.. Моделирование и исследование режимов работы солнечной фотоэлектрической станции с контроллером максимальной мощности // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 13-14. С. 38–50. https://doi.org/10.15518/isjaee.2015.13-14.004
16. Коршунов А. Динамический расчет стабилизированного понижающего преобразователя напряжения постоянного тока // Силовая электроника. 2005. № 3. С. 88–91.
17. Ayop R., Tan Chee. Design of boost converter based on maximum power point resistance for photovoltaic applications // Solar Energy. 2018. Vol. 160. P. 322–335. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.016
18. Белов Г., Павлова А., Серебрянников А. Структурные динамические модели и частотный метод синтеза двухконтурных систем управления импульсными преобразователями напряжения // Силовая электроника. 2008. № 17. С. 98–106.
19. Rashid M.H. Power Electronics Handbook: 3-d edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. 1408 p. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-088479-7.X5018-4
20. Shebani M.M., Iqbal T., Quaicoe J.E. Comparing bisection numerical algorithm with fractional short circuit current and open circuit voltage methods for MPPT photovoltaic systems // Electrical Power and Energy Conference (EPEC) (Ottawa, 12–14 October 2016). Ottawa: IEEE, 2016. P. 1–5. https://doi.org/10.1109/EPEC.2016.7771689
21. Loukriz A., Haddadi M., Messalti S. Simulation and experimental design of a new advanced variable step size incremental conductance MPPT algorithm for PV systems // ISA Transactions. 2016. Vol. 62. P. 30–38. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2015.08.006

References

1. Jäger-Waldau A. *PV Status Report 2018*. Luxembourg: Office of the European Union; 2018, 88 p. http://dx.doi.org/10.2760/826496
2. On the mechanism for stimulating the use of renewable energy sources in the wholesale market of electric energy and power. *Oficial'nyj internet-portal pravovoj informacii.* Available from: http://www.pravo.gov.ru [Accessed 26th September 2019]. (In Russ.)
3. On amendments to some acts of the Government of the Russian Federation on the issues of stimulating the use of renewable energy sources in retail electrical energy markets. *Oficial'nyj internet-portal pravovoj informacii.* Available from: http://www.pravo.gov.ru [Accessed 26th September 2019]. (In Russ.)
4. Development stimulating plan for generating facilities based on renewable energy sources with an installed capacity of up to 15 kW. Available from: http://static.government.ru/media/files/D7T1wAHJ0E8v

EWst5MYzr5DOnhHFA3To.pdf [Accessed 30th September 2019]. (In Russ.)
5. Unified Energy System of Russia: interim results (real-time data) of 2018. *Sistemnyj Operator Edinoj Energeticheskoj Sistemy. Informacionnyj obzor* = System Operator of the Unified Energy System. Information review. Available from: https://so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2018/ups_review_0218.pdf [Accessed 30th September 2019]. (In Russ.)
6. Ghetty PPK. Switch-mode power supply design, 1990, 238 p. (Russ. ed.: *Proektirovanie klyuchevyh istochnikov elektropitaniya.* Moscow, Energoatomizdat, 1990, 238 p.)
7. Mack R. Switching Power Supplies. Theoretical design basics and practical application guidelines. Series: Power Electronics, 2008, 272 p. (Russ. ed.: *Impul'snye istochniki pitaniya. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya i rukovodstvo po prakticheskomu primeneniyu. Seriya: Silovaya elektronika.* Moscow, "Dodeka-XXI", 2008, 272 p.)
8. Nayak B, Mohapatra A, Mohanty KB. Selection criteria of DC-DC converter and control variable for MPPT of PV system utilized in heating and cooking applications. Electrical & Electronic Engineering. 2017;4:1–16. https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1363357
9. Khatib T, Ibrahim IA, Mohamed A. A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a stand-alone photovoltaic system. Energy Conversion and Management. 2016;120:430–448. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.011
10. Chauhan A, Saini RP. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014;38:99–120. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.079
11. Asim A, Amir A, Che Hang Seng, Elkhateb A, Rahim NA. Comparative analysis of high voltage gain DC-DC converter topologies for photovoltaic systems. Renewable Energy. 2019;136:1147–1163. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.089
12. Rezk H, Fathy A, Abdelaziz AY. A comparison of different global MPPT techniques based on meta-heuristic algorithms for photovoltaic system subjected to partial shading conditions. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017;74:377–386. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.051
13. Ibrahim A, Aboelsaud R, Obukhov S. Improved particle swarm optimization for global maximum power point tracking of partially shaded PV array. Electrical Engineering. 2019;101:443–455. https://doi.org/10.1007/s00202-019-00794-w
14. Obukhov SG, Plotnikov IA. Model of solar module in MATLAB SIMULINK. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* = Alternative Energy and Ecology. 2014;21:51–59. (In Russ.)
15. Obukhov SG, Plotnikov IA. Modeling and study of modes of solar photovoltaic power plant with a maximum power point tracing controller. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* = Alternative Energy and Ecology. 2015;13-14:38–50. (In Russ.) https://doi.org/10.15518/isjaee.2015.13-14.004
16. Korshunov A. Dynamic calculation of a stabilized buck DC voltage converter. *Silovaya elektronika* = Power Electronics. 2005,3:88–91. (In Russ.)
17. Ayop R, Tan Chee Wei. Design of boost converter based on maximum power point resistance for photovoltaic applications. Solar Energy. 2018;160:322–335. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.016
18. Belov G, Pavlova A, Serebryannikov A. Structural dynamic models and the frequency synthesis method of dual-circuit control systems for pulsed voltage converters. *Silovaya elektronika* = Power Electronics. 2008;17:98–106. (In Russ.)
19. Rashid MH. *Power Electronics Handbook*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2011, 1408 p. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-088479-7.X5018-4
20. Shebani MM, Iqbal T, Quaicoe JE. Comparing bisection numerical algorithm with fractional short circuit current and open circuit voltage methods for MPPT photovoltaic systems. In: *Electrical Power and Energy Conference (EPEC).* 12–14 October 2016, Ottawa. Ottawa: IEEE; 2016, p. 1–5. https://doi.org/10.1109/EPEC.2016.7771689
21. Loukriz A, Haddadi M, Messalti S. Simulation and experimental design of a new ad-vanced variable step size incremental conductance MPPT algorithm for PV systems. ISA Transactions. 2016;62:30–38. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2015.08.006

Критерии авторства

Обухов С.Г., Ибрагим А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Authorship criteria

Obukhov S.G., Ibrahim A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Обухов Сергей Геннадьевич,
доктор технических наук, доцент,
профессор отделения электроэнергетики
и электротехники,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
✉ e-mail: serob99@mail.ru

Ибрагим Ахмед,
аспирант,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
e-mail: ibragim@tpu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey G. Obukhov,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Electric Power
and Electrical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia;
✉ e-mail: serob99@mail.ru

Ahmed Ibrahim,
Postgraduate Student,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia;
e-mail: ibragim@tpu.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.311.001
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-183-194

Разработка программно-технических средств моделирования ветроэнергетической установки 4 типа

© И.А. Разживин, Н.Ю. Рубан, А.Б. Аскаров, Р.А. Уфа
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Резюме: Цель – гибридное моделирование ветроэнергетических установок 4 типа, позволяющее получить достаточно полную и достоверную информацию о процессах в ветроэнергетических установках указанного типа, а также оценить влияние их внедрения в электроэнергетические системы в целом. В настоящее время в мире быстрыми темпами развивается возобновляемая энергетика преимущественно с использованием ветроэнергоустановок. Для решения большинства задач исследования, проектирования и эксплуатации ветроэнергетических установок в составе электроэнергетических систем необходима полная и достоверная информация о едином непрерывном спектре нормальных и анормальных квазиустановившихся и переходных процессов в исследуемом оборудовании и электроэнергетической системе в целом. Единственным путем получения такой информации становится преимущественно математическое моделирование ввиду недопустимости натурных экспериментов в реальных электроэнергетических системах, особенно экспериментов аварийного характера, а также значительной ограниченности физического моделирования подобных систем. В то же время существует определенная проблема получения достоверной информации путем математического моделирования вследствие необходимости решения жестких систем дифференциальных уравнений большого порядка, описывающих процессы в элементах ветроэнергетических установок и электроэнергетических системах в целом. Данная проблематика присуща всем программно-вычислительным и программно-аппаратным комплексам для расчета режимов и процессов в электроэнергетических системах, которые неизбежно используют методы численного интегрирования, в результате чего достоверность подобных расчетов нередко оказывается низкой или неудовлетворительной. В статье представлено описание альтернативного комплексного подхода к моделированию ветроэнергетических установок 4 типа. Средством реализации данного подхода является разработанный специализированный гибридный процессор ветроэнергетических установок 4 типа, который предназначен для работы в составе Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем. Также в статье приведены фрагменты тестовых исследований произведенного специализированного гибридного процессора, подтверждающие его правильную работу. Предложенное в статье решение вопроса адекватного моделирования ветроэнергетических установок 4 типа является новым и актуальным, позволяющим (применительно к конкретной электроэнергетической системе, ее составу и топологии) получить достаточно достоверную всережимную информацию о протекающих в ней процессах для дальнейшего планирования режимов, настройки систем автоматического управления, средств релейной защиты, автоматики и др.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, возобновляемые источники энергии, электроэнергетическая система, математическое моделирование, гибридное моделирование

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № МК-1675.2019.8.

***Информация о статье*:** Дата поступления 10 июня 2019 г.; дата принятия к печати 12 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Разживин И.А., Рубан Н.Ю., Аскаров А.Б., Уфа Р.А. Разработка программно-технических средств моделирования ветроэнергетической установки 4 типа. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2020. Т. 24. № 1. С. 183–194. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-183-194

Development of hardware and software simulation tools for 4 type wind turbine modeling

Igor A. Razzhivin, Nikolay Yu. Ruban, Alisher B. Askarov, Ruslan A. Ufa
National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is a hybrid simulation of 4 type wind power plants, which allows to obtain a fairly

complete and reliable information about the processes taking part in the wind power plants of the specified type, as well as to evaluate the effect from their implementation in power systems as a whole. Today renewable energy is developing rapidly in the world mainly due to the use of wind power plants. To solve most of the problems of study, design and operation of wind power plants as the components of the electric power system we need complete and reliable information about the single continuous spectrum of normal and abnormal quasi-established and transient processes in the equipment under investigation and in the electric power system as a whole. Mathematical modeling becomes the only way of obtaining such information since full-scale experiments are inadmissible in real electric power systems (especially emergency ones) and physical modeling of such systems has significant limitations. At the same time, there is a certain problem of obtaining reliable information via mathematical modeling due to the need to solve rigid systems of large order differential equations describing the processes in the elements of wind power plants and electric power systems as a whole. This problem is characteristic of all software, computing and hardware-software systems designed for calculating modes and processes in electric power systems. They inevitably use numerical integration methods as a result the reliability of such calculations is low or unsatisfactory. The article describes an alternative integrated approach to 4 type wind turbine modeling. This approach is implemented by means of the developed specialized hybrid processor of type 4 wind power plants, which is designed to operate as a part of the All-mode real-time modeling complex of electric power systems. The article provides the fragments of test studies of the produced specialized hybrid processor that confirm its correct operation. The solution of the problem of adequate modeling of 4 type wind turbines proposed in the article is new and relevant (as applied to the certain electric power system, its composition and topology) and allows to obtain sufficiently reliable, all-mode information on the processes occurring in it for further planning of modes, setting of automatic control systems, relay protection, automation, etc.

Keywords: wind turbine, renewable sources of energy, electric power system, mathematical modeling, hybrid modeling

Acknowledgments: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant No. MK-1675.2019.8.

Information about the article: Received June 10, 2019; accepted for publication December 12, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Razzhivin IA, Ruban NYu, Askarov AB, Ufa RA. Development of hardware and software simulation tools for 4 type wind turbine modeling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):183–194. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-183-194

1. ВВЕДЕНИЕ

Необходимость в энергетической безопасности, ограниченность углеводородных и урановых ресурсов, а также положения Киотского протокола послужили основным двигателем в развитии возобновляемой энергетики в большинстве стран мира. Среди возобновляемых источников энергии наибольшими темпами развивается ветроэнергетика. Согласно данным Глобального совета по ветроэнергетике, на конец 2018 г. суммарная установленная мощность ветроэнергетических установок (ВЭУ) в мире составила порядка 592 ГВт. В течение данного года более чем в 40 различных странах было ведено около 51,3 ГВт новых мощностей на базе ВЭУ [1–5]. Таким образом, постепенно во многих странах мира ВЭУ, объединяемые в мощные ветроэлектростанции (ВЭС), стали неотъемлемой частью электроэнергетических систем (ЭЭС). Причем среди разных видов ВЭУ наиболее применимыми для работы в составе ЭЭС являются ВЭУ 4 типа, представляющие собой ветротурбину с синхронным генератором с возбуждением от постоянных магнитов, присоединенным через вставку постоянного тока и трансформатор связи к узлу ЭЭС[1] [6].

Для российской энергетики ограниченность углеводородными и урановыми ресурсами не предвидится в ближайшей перспективе, однако актуальность исследования совместной работы ВЭУ в ЭЭС для России обусловлена строительством и внедрением в ЭЭС юга России порядка 1,5 ГВт ветрогенерации к 2020 г. [7, 8]. Для энергосистемы России ВЭУ являются новыми элементами, технические требования

[1]Венге К., Геске М., Ломбарди П., Москаленко Н., Музиковски Х.-Д., Повалко М. [и др.]. Возобновляемые источники энергии: теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика: учеб. пособ. / под ред. З.А. Стычинского, Н.И. Воропая. Магдебург: Изд-во ун-та Отто-фон-Герике, 2010. 211 с.

к которым в части их параллельной работы с ЭЭС до настоящего времени не разрабатывались. В то же время большой опыт применения ВЭУ накоплен за рубежом, где разработаны и с каждым годом актуализируются технические и технологические требования к подобного рода установкам. Во многих странах данные требования отражаются в нормативных документах и стандартах (сетевых кодексах) на национальном уровне [9]. Например, в зарубежных сетевых кодексах Дании, Германии, Китая, США и др. сформулированы особые требования о недопустимости отключения установок на базе ВЭУ при различных типах возмущений: способность поддержания непрерывного энергоснабжения при возмущениях или способность поддержания непрерывности электроснабжения при низком напряжении (fault ride-through или low voltage ride-through capabilities, соответственно). Такие требования разрабатываются и принимаются для каждой топологии сети индивидуально, что значительно актуализирует необходимость исследования работы ВЭУ в ЭЭС России. В связи с этим описанный в статье комплексный подход к моделированию ВЭУ 4 типа позволяет получить для этого всю необходимую информацию.

2. ПРОБЛЕМАТИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Для решения большинства задач исследования, проектирования и эксплуатации ЭЭС, в том числе ЭЭС с ВЭУ, необходима полная и достоверная информация о едином непрерывном спектре нормальных и анормальных квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании и ЭЭС в целом. Ввиду недопустимости натурных экспериментов в реальных ЭЭС, особенно экспериментов аварийного характера, а также значительной ограниченности физического моделирования ЭЭС единственным путем получения всей необходимой информации становится преимущественно математическое моделирование[2] [10, 11].

Однако полученная в результате совокупная математическая модель любой реальной ЭЭС, в том числе с ВЭУ, даже с учетом приемлемого частичного эквивалентирования, неизбежно содержит жесткую нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно большой, по математическим меркам, размерности, плохо обусловленную на ограничительных условиях применимости теории методов численного интегрирования и, соответственно, не подлежащую удовлетворительному решению [12, 13].

Единственный путь улучшения обусловленности – это снижение жесткости и размерности совокупной системы дифференциальных уравнений, которые могут быть осуществлены только за счет радикального ее упрощения и применения декомпозиции, в соответствии с ней выделяются и раздельно рассчитываются нормальные и аварийные установившиеся режимы, а также различные стадии переходных процессов на ограниченном интервале их воспроизведения. В результате существенно утрачивается полнота и достоверность получаемой таким образом информации. Кроме этого, независимо от всех упрощений и ограничений, методическая ошибка, принципиально характерная численному интегрированию дифференциальных уравнений, всегда остается неизвестной.

Вышеобозначенная проблематика свойственна всем программно-вычислительным (ПВК) и программно-аппаратным комплексам (ПАК) для расчета режимов ЭЭС с ВЭУ, которые неизбежно используют методы численного интегрирования. Распространенными ПВК для моделирования ЭЭС и ЭЭС с ВЭУ являются EMTDC/PSCAD (Power Systems Computer Aided Design/Electro Magnetic Transients including DC), EMTP (Elecro Magnetic Transient Program), MATLAB Simulink, PSS/E

[2]Веников В.А. Теория подобия и моделирования: учеб. пособ. М.: Высш. шк., 1976. 479 с.

(Power System Simulator for Engineering), SIMPOW (SIMulation of POWer systems) и DIgSILENT (PowerFactory) [14, 15]. При моделировании больших моделей ЭЭС их вычислительные мощности и возможности ограничены, к примеру, в EMTP моделирование 10-секундного режима работы 5 ВЭУ с эквивалентной ЭЭС с шагом 50 мкс может занимать до 10 мин [16].

Моделирование ВЭС в составе ЭЭС – задача трудоемкая, т.к. реальные ВЭС объединяют в себе десятки ВЭУ, присоединенных к общему узлу ЭЭС, а использование эквивалентных моделей для представления ВЭС не является достаточным для получения полных сведений о динамике ВЭС, более того, в ВЭС выработка мощности отдельными ВЭУ различна в силу неравномерности распределения скорости ветра, различия рельефа и т.д. Разные типы ВЭУ имеют неодинаковую реакцию на возникающие возмущения (особенно аварийные) из-за их различных механических и электрических параметров (скорости ветра, электрической удаленности от места присоединения).

Несмотря на достаточно глубокое изучение ВЭУ и ЭЭС, комплекс вопросов, связанных с получением достаточно полной и достоверной информации о работе ВЭУ в ЭЭС остается актуальным и сейчас.

3. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

На основании вышеизложенного, разработана концепция всережимного гибридного моделирования ВЭУ 4 типа в составе ЭЭС в темпе реального времени и на неограниченном интервале, а также средства ее реализации. Гибридное моделирование включает:

1) аналоговую часть – для решения систем дифференциальных уравнений математически моделируемого оборудования используется способ методически точного непрерывного неявного интегрирования, осуществляемый посредством разработки специализированных параллельных цифро-аналоговых структур – гибридных сопроцессоров (ГСП);

2) физическое моделирование – воспроизведение спектра всевозможных коммутационных процессов оборудования ВЭУ, связанных с различными короткими замыканиями, работой выключателей и силовых полупроводниковых элементов вставки постоянного тока (ВПТ), обеспечивается с помощью цифроуправляемых физических моделей на базе цифроуправляемых аналоговых ключей (ЦУАК);

3) цифровую часть, обеспечивающую управление коэффициентами и параметрами математически моделируемого оборудования ВЭУ, состоянием ЦУАК, всех информационно-управляющих функций, отображение и преобразование информации, реализацию алгоритмов автоматики и релейной защиты.

В Томском политехническом университете разработан Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС). Данная разработка является наиболее проработанным решением, позволяющим решать обозначенные проблемы моделирования, что подтверждается множеством экспериментальных исследований. ВМК РВ ЭЭС представляет собой многопроцессорную программно-техническую систему реального времени гибридного типа, объединяющую в себе адаптируемую совокупность специализированных гибридных процессоров (СГП) всего значимого оборудования моделируемой ЭЭС [17]. В соответствии с гибридным подходом для решения задач моделирования ВЭУ в ЭЭС разработан неприменимый ранее СГП ВЭУ 4 типа (рис. 1).

Моделирование ВЭУ 4 типа в ВМК РВ ЭЭС позволяет исключить:

– декомпозицию режимов и процессов;

– упрощение математических моделей оборудования и ЭЭС;

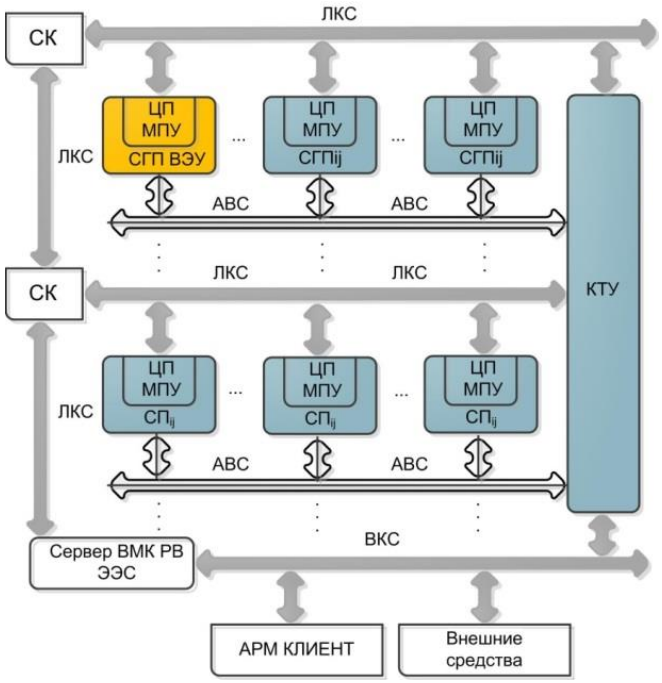


Рис. 1. Структурная схема Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем: ВС – внешние средства (СМПР, SCADA, PMU), КТУ – коммутатор трехфазных узлов, СК – сетевой коммутатор, ЛКС – локальная компьютерная сеть, ВКС – внешняя компьютерная сеть; АРМ клиент – автоматизированное рабочее место клиента, ЦП – центральный процессор, МПУ – микропроцессорный узел

Fig. 1. Block diagram of All-mode modeling complex of energy system real time: BC – external means (Transient Mode Monitoring System, SCADA, PMU), КТУ – three-phase node switchboard, СК – network switchboard, ЛКС – local computer network, ВКС – external computer network; client АРМ – automated client workstation; ЦП – central processor; МПУ – microprocessor node

– ограничение интервала воспроизведения процессов и методическую ошибку путем применения метода непрерывного, неявного, параллельного, методически точного интегрирования в реальном времени.

Для реализации совокупной математической модели ВЭУ 4 типа разработаны структура и средства реализации СГП ВЭУ 4 типа с учетом сопутствующего оборудования (рис. 2).

1. ЦП предназначен для обеспечения взаимодействия между Сервером ВМК РВ ЭЭС и ПАЦП, Сопроцессором и ПК посредством ЛКС, и выполняет функции приема режимных данных от Сервера ВМК РВ ЭЭС, а также задание их в соответствующие ГСП, передачу данных моделирования на Сервер ВМК РВ ЭЭС, синхронизацию работы всех процессоров МПУ СГП ВЭУ в ВМК РВ ЭЭС.

2. Посредством ПАЦП обеспечивается аналого-цифровое преобразование, чтение и обработка данных моделирования, а также функциональное управление, включая динамическое, задаваемыми в соответствующие ГСП параметрами моделируемого оборудования, в частности электрической машины, трансформатора связи и др., а также передачу необходимых режимных данных и параметров в сопроцессор. Кроме этого, в ПАЦП осуществляется оцифровка и функциональная обработка данных моделирования для реализации алгоритмов системы автоматического управления преобразователем: преобразование координат, формирование управляющих воздействий для широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и др.

3. СП осуществляет прием данных от ЦП и ПАЦП для решения модели так называемого первичного двигателя (модель ветра, модель аэродинамического преобразования) и реализации системы автоматического управления (угол тангажа,

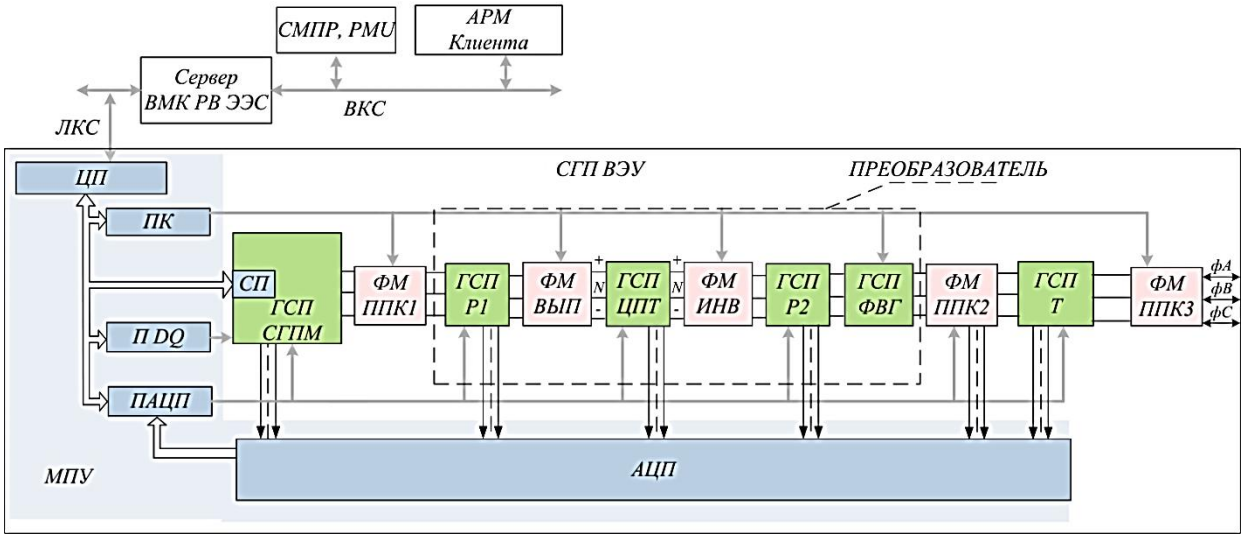


Рис. 2. Структурная схема специализированного гибридного процессора ветроэнергетической установки 4 типа: СП – сопроцессор; ПК – процессор коммутации; П DQ – процессор DQ преобразований; ПАЦП – процессор АЦП; ГСП СГПМ – гибридный сопроцессор синхронного генератора с системой возбуждения от постоянных магнитов; ФМ ППК 1, ППК 2, ППК 3 – физическая модель продольно-поперечного коммутатора; ГСП Р1, Р2 – гибридный сопроцессор реактора 1 и 2; ФМ ВЫП – физическая модель преобразователя напряжения, обеспечивающая выпрямление, ФМ ИНВ – физическая модель преобразователя напряжения обеспечивающая инвертирование; ГСП ЦПТ – гибридный сопроцессор цепи постоянного тока; ГСП ФВГ – гибридный сопроцессор фильтра высших гармоник; ГСП Т – гибридный сопроцессор трансформатора, применяется для согласования уровней напряжения сети и выходного напряжения ветроэнергетических установок

Fig. 2. Block diagram of the specialized hybrid processor of the type 4 wind power plant СП – coprocessor; ПК – switching processor; П DQ – DQ transform processor; ПАЦП – ADC processor, ГСП СГПМ – hybrid coprocessor of a synchronous generator with a constant magnet excitation system; ФМ ППК 1, ППК 2, ППК 3 – physical model of the longitudinal-transverse switch; ГСП Р1, Р2 – hybrid co-processor of reactor 1 and 2; ФМ ВЫП – physical model of voltage converter providing rectification; ФМ ИНВ – physical model of voltage converter providing inverting; ГСП ЦПТ – hybrid DC co-processor; ГСП ФВГ – hybrid coprocessor of higher harmonics filter; ГСП Т – hybrid co-processor of a transformer used for matching network voltage levels and the output voltage of wind turbines

работа преобразователя), а также для формирования и трансляции параметров в гибридный сопроцессор электрической машины ВЭУ.

Моделирование ветрового потока и его аэродинамическое преобразование реализовано в СП СГП ВЭУ 4 типа путем синтезирования математических моделей, принятых в мировой электроэнергетике [6, 18]. Модель аэродинамического преобразования с учетом задания модели системы управления углом тангажа β может быть представлена уравнением (1):

$$P_{MEX} = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 V^3 C_P\left(Z,\beta\right), \quad (1)$$

где C_p – коэффициент использования энергии ветра; ρ – плотность воздуха, πR^2 – площадь, ометаемая ветроколесом; R – радиус ветроколеса; V – скорость ветра; β – угол атаки лопастей ветроколеса (угол тангажа).

Модель ветрового потока с учетом его турбулентной составляющей описывается выражением (2):

$$V = V_0 + V\left(t\right), \quad (2)$$

где V_0 – средняя скорость ветра, определяемая по справочникам и кадастрам с учетом географического расположения и высоты ВЭУ; $V(t)$ – турбулентная составляющая скорости ветра, аппроксимируемая спектральной моделью Каймала.

Также в СП решается математическая модель уравнения движения ротора

ВЭУ, по результатам решения которой вычисляется угловая частота вращения ротора ВЭУ.

4. В ПК реализуются ШИМ и формирование управляющих воздействий для ЦУАК ФМ преобразователей напряжения ВПТ и ППК.

5. МПУ обеспечивает все информационно-управляющие функции СГП ВЭУ 4 типа: коммуникации с Сервером ВМК РВ ЭЭС, прием и обработка данных моделирования, реализация системы управления ВЭУ, управление параметрами моделируемого оборудования, в том числе состоянием ЦУАК.

В качестве примера рассмотрена функциональная схема ГСП синхронного генератора на постоянных магнитах (СГПМ) (рис. 3).

Адаптированная для СГПМ всережимная математическая модель с взаимным преобразованием переменных *dq* ↔ *ABC* образуют систему уравнений [19-20]:

1. Уравнение внутренних электродвижущих сил (ЭДС) в воздушном зазоре в осях *dq*:

$$E_{id} = x_{ad} i_d + E_{ПМ}, E_{iq} = x_{aq} i_q + E_{ПМ}. \quad (3)$$

2. Уравнение для токов статорных и роторных контуров в осях *dq*:

$$i_d = \frac{1}{x_\sigma}(\Psi_d - E_{id}),\ i_q = \frac{1}{x_\sigma}(\Psi_q - E_{iq}). \quad (4)$$

3. Уравнение напряжения статора по оси *q*:

$$u_q = \omega\Psi_d - \frac{d\Psi_q}{dt} - r_a i_q. \quad (5)$$

4. Уравнение напряжения статора по оси *d*:

$$u_d = -\omega\Psi_q - \frac{d\Psi_d}{dt} - r_a i_d, \quad (6)$$

где $\frac{d\Psi_q}{dt}$, $\frac{d\Psi_d}{dt}$, $\omega\Psi_d$, $\omega\Psi_q$ – соответствующие трансформаторные ЭДС и ЭДС вращения; i_d, i_q – составляющие тока статора в системе *dq*; r_a – активное сопротивление статорной обмотки; u_d, u_q – составляющие напряжения статора в системе *dq*;

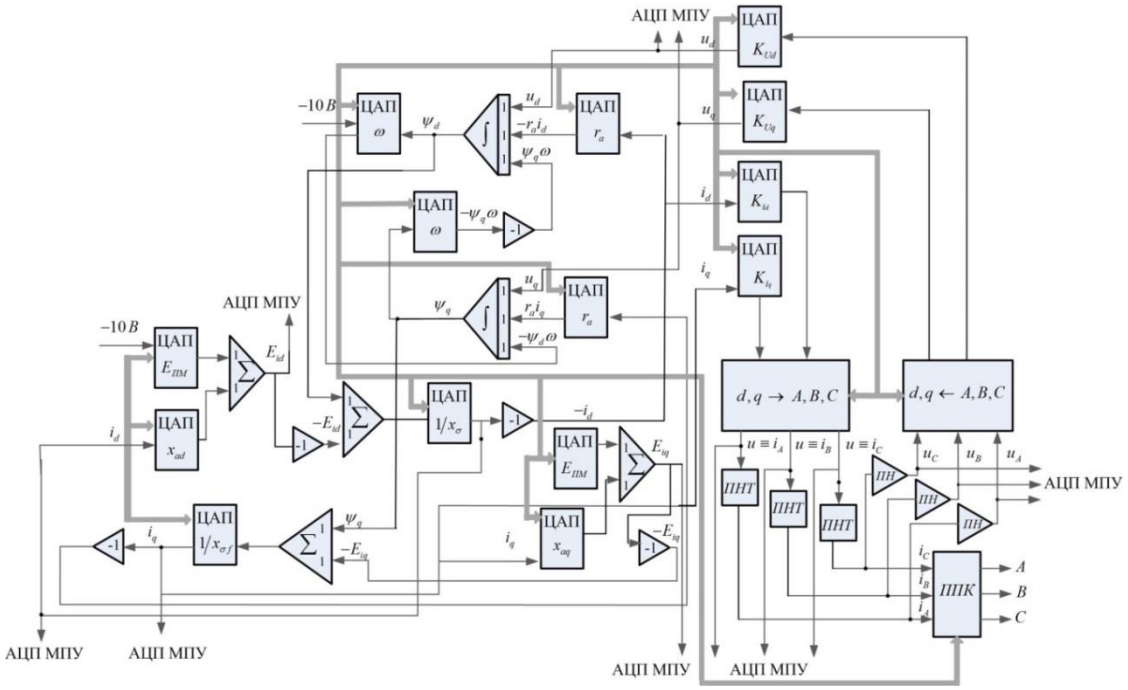


Рис. 3. Функциональная схема гибридного сопроцессора синхронного генератора на постоянных магнитах

Fig. 3. Functional diagram of hybrid coprocessor of synchronous permanent magnet generator

x_σ – сопротивление рассеяния контуров статора; x_{aq}, x_{ad} – сопротивления взаимоиндукции в соответствующих осях между контурами ротора и статора; $E_{ПМ}$ – ЭДС, формируемая в обмотках статора постоянными магнитами.

5. Формируемая в ЦП $E_{ПМ}$ определяется в соответствии со следующим выражением:

$$E_{ПМ} = \frac{4K_{ОБ}K_{Ф}}{p} W_{Ф} f D_M L_M B_r, \qquad (7)$$

где $W_{Ф}$ – число витков в фазной обмотке; $K_{ОБ}$ – обмоточный коэффициент; $K_{Ф}$ – коэффициент формы магнитного поля; D_M – диаметр постоянного магнита; L_M – длина активной части статора; B_r – значение магнитной индукции, создаваемое постоянным магнитом; p – число пар полюсов; f – частота.

Гибридные сопроцессоры трансформатора связи, фильтра высших гармоник, фазных реакторов, ЦПТ воспроизводятся аналогичным способом посредством специализированных параллельных цифро-аналоговых структур.

4. ТЕСТИРОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ГИБРИДНОГО ПРОЦЕССОРА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Для оценки свойств и возможностей разработанного СГП ВЭУ 4 типа, а также для подтверждения правильности воспроизведения посредством СГП ВЭУ 4 типа нормальных и анормальных квазиустановившихся и переходных процессов, было проведено тестирование разработанного СГП ВЭУ 4 типа с аналогичной моделью, реализованной в ПАК Real Time Digital Power System Simulator (RTDS), предназначенном для моделирования тестовых схем ЭЭС в режиме реального времени.

В качестве примера в статье приведены фрагменты тестовых исследований динамики работы ВЭУ 4 типа с мощностью 5 МВт в режиме реального времени при ступенчатом изменении момента турбины ВЭУ (рис. 4), а также при моделировании трехфазного короткого замыкания на шинах трансформатора связи (рис. 5–6).

На рис. 4 представлены осциллограммы активной мощности действующего значения тока и момента ВЭУ при его ступенчатом изменении. Результаты моделирования согласуются с аналогичными результатами, полученными в RTDS.

Полученные осциллограммы мгновенных значений тока трех фаз и активной мощности СГПМ при возникновении трехфазного короткого замыкания на шинах трансформатора связи ВЭУ (рис. 5–6) в целом демонстрируют схожий характер протекания переходных процессов. Однако, как можно заметить, характер изменения значений активной мощности, а также фазных токов, полученных с помощью разработанного СГП ВЭУ 4 типа, несколько отличается от того, который получен посредством моделирования в RTDS. Различия в активной мощности связаны, с одной стороны, с возникновением коммутационных перенапряжений при устранении короткого замыкания, воспроизведение которых путем цифрового моделирования не соответствует реальному характеру переходного процесса, а с другой – использованием в RTDS фильтра нижних частот первого порядка, интегрированного в саму модель машины на постоянных магнитах, с постоянного времени τ = 0,02 с для регистрации значений выходной мощности. При этом в разработанном СГП все коммутации производятся на физическом уровне посредством ЦУАК, что является более достоверным воспроизведением обозначенных процессов коммутации, а измерение, регистрация и осциллографирование параметров осуществляются в изначальном виде исходя из мгновенных значений без предварительной обработки. Искажения синусоидальности фазных токов у СГП ВЭУ сопряжены с наличием спектра высших гармоник в начальный момент возникновения короткого замыкания (в течение примерно

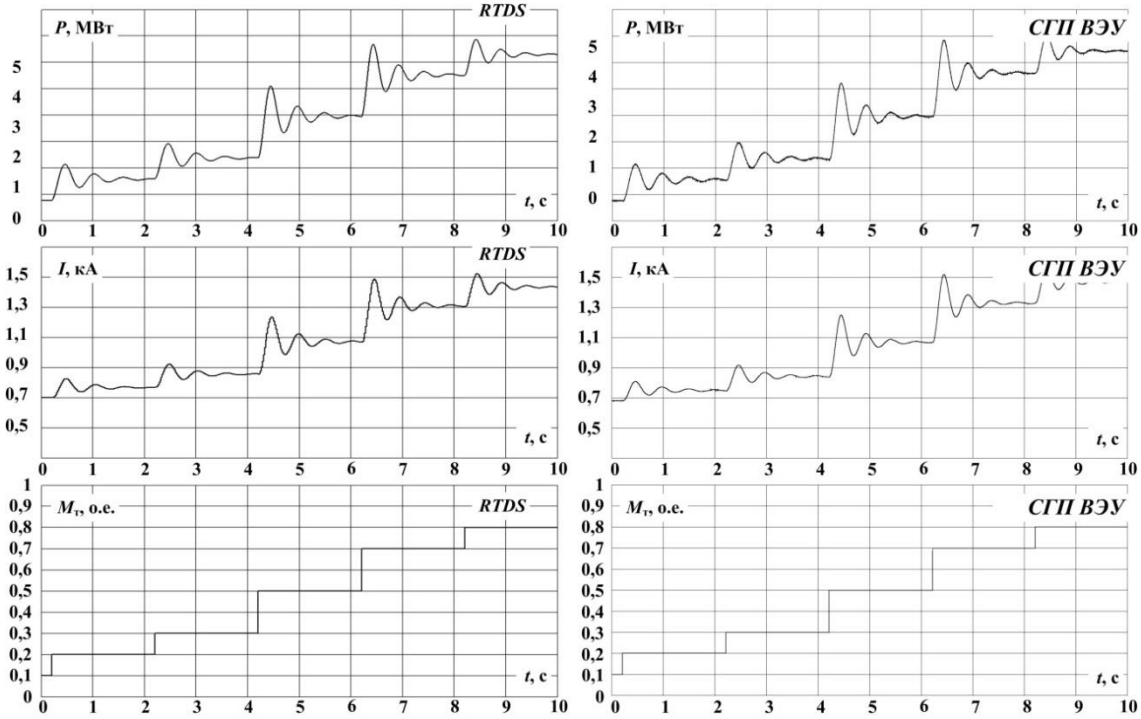


Рис. 4. Результирующие осциллограммы синхронного генератора на постоянных магнитах при ступенчатом изменении момента турбины (P – активная мощность, I – полный ток, M_T – момент турбины)
Fig. 4. Resulting oscillograms of a synchronous permanent magnet generator under a step change in the turbine moment (P – active power, I – total current, M_T – turbine moment)

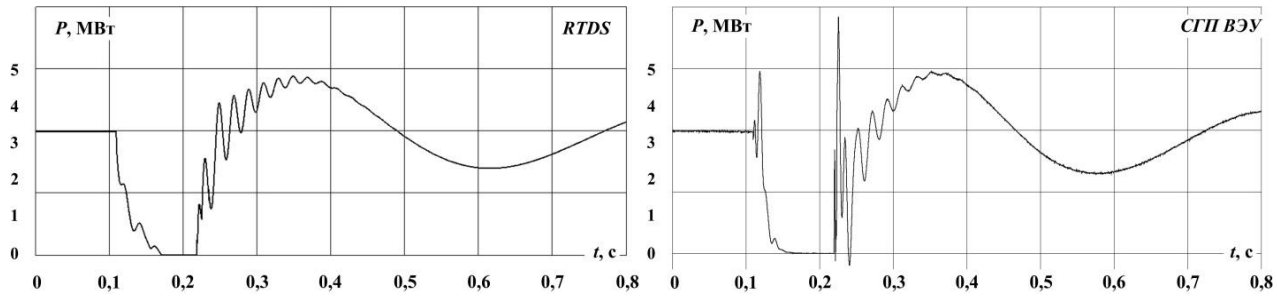


Рис. 5. Результирующие осциллограммы активной мощности (P) синхронного генератора на постоянных магнитах при возникновении трехфазного короткого замыкания
Fig. 5. Resulting oscillograms of the active power (P) of the synchronous permanent magnet generator under the three-phase short circuit mode

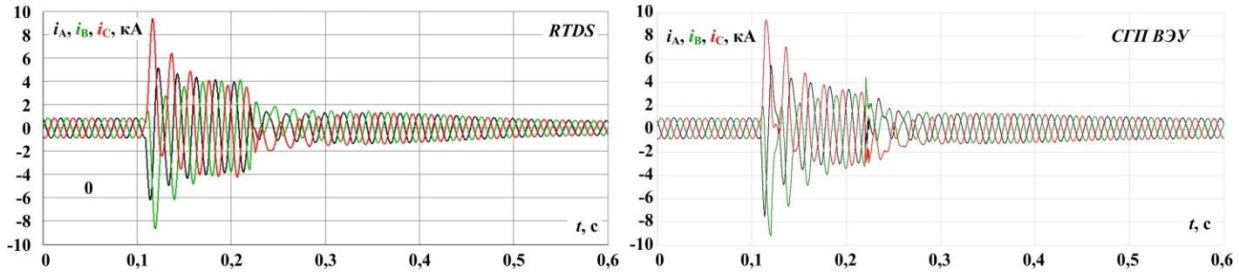


Рис. 6. Результирующие осциллограммы фазных токов (i_A, i_B, i_C) синхронного генератора на постоянных магнитах при возникновении трехфазного короткого замыкания
Fig. 6. Resulting waveforms of phase currents (i_A, i_B, i_C) of the synchronous permanent magnet generator in the three-phase short circuit mode

0,05 с, далее токи имеют синусоидальный вид), поскольку замыкание фаз на землю с помощью упомянутых аналоговых ключей осуществляется поочередно с неопределенной задержкой по времени (в сравнении с математической моделью в RTDS), которая напрямую зависит от характеристик используемой элементной базы, что несколько более адекватно отображает моделируемый процесс и в то же время незначительно влияет на разницу в значениях (относительная погрешность составляет примерно 1,7%) и характер протекания процесса.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлено описание предложенной концепции всережимного моделирования ВЭУ 4 типа в ЭЭС в реальном времени и на неограниченном интервале, а также средства ее реализации. Разработанный СГП ВЭУ 4 типа позволяет принципиально исключить проблемы, препятствующие достаточно полному и достоверному моделированию единого непрерывного спектра квазиустановившихся и переходных процессов ВЭУ в ЭЭС при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах ее работы. Разработанные средства могут быть использованы для прогнозирования работы ВЭУ 4 типа в ЭЭС для дальнейшей настройки систем автоматического управления ВЭУ, устройств релейной защиты и автоматики внешней ЭЭС и др. В рамках предложенного подхода в дальнейшем планируется реализовать модели ВЭУ 1–3 типов. Предложенное решение мультипликативно и может быть использовано при моделировании ВЭС неограниченной размерности.

Библиографический список

1. Muljadi E., Yin Cheng Zhang, Gevorgian V., Kosterev D. Understanding Dynamic Model Validation of a Wind Turbine Generator and a Wind Power Plant // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (Milwaukee, 18–22 September 2016). Milwaukee: IEEE, 2016. P. 1–5. https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7855542
2. Аюев Б.И., Герасимов А.С., Есипович А.Х., Куликов Ю.А. Верификация цифровых моделей ЕЭС/ОЭС // Электричество. 2008. № 5. С. 2–7.
3. Герасимов А.С., Есипович А.Х., Смирнов А.Н. Об опыте верификации цифровых и физических моделей энергосистем // Электрические станции. 2010. № 11. С. 14–19.
4. Renewables 2018 // Global Status Report [Электронный ресурс]. URL: https://www.ren21.net/reports/global-status-report/ (13.03.2019).
5. Annual Global Wind Report // GWEC Global Wind Energy Council [Электронный ресурс]. URL: https://gwec.net/members-area-market-intelligence/reports/ (13.03.2019).
6. Ackermann T. Wind Power in Power Systems. 2nd ed. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 2012. 1049 p. https://doi.org/10.1002/0470012684
7. Фонд Роснано и Фортум получили право строительства 823 МВт ветрогенерации // Роснано [Электронный ресурс]. URL: http://www.rusnano.com/about/press-centre/news/20180613-rosnano-fond-razvitiya-vetroenergetiki-poluchil-pravo-stroitelstva-823-mvt-vetrogeneratsii (15.03.2019).
8. Росатом применит в проектах по ветроэнергетике лопасти производства GE // РИА Новости [Электронный ресурс]. URL: https://ria.ru/atomtec/20180513/1520441828.html (15.03.2019).
9. The Grid Code. 2017. Issue 5. 698 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.nationalgrid.com/sites/default/files/documents/8589935310-Complete%20Grid%20Code.pdf (15.03.2019).
10. Hengdao Guo, Ciyan Zheng, Herbert Ho-Ching Iu, Fernando T. A critical review of cascading failure analysis and modeling of power system // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 80. P. 9–2. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.206
11. Negnevitsky M., Voropai N., Kurbatsky V., Tomin N., Panasetsky D. Development of an intelligent system for preventing large-scale emergencies in systems // Power and Energy Society General Meeting (Vancouver, 21–25 July 2013). Vancouver: IEEE, 2013. P. 1–5. https://doi.org/10.1109/PESMG.2013.6672099
12. Butcher J.C. Numerical methods for ordinary differential equations // John Wiley & Sons. 2016. P. 31–40 https://doi.org/10.1002/9781119121534
13. Холл Д., Уатт Д. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / пер. с англ. М.: Мир, 1979. 312 с.
14. Lund T., Eek J., Uski S., Perdana A. Dynamic fault simulation of wind turbines using commercial simulation tools // 5th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms (Glasgow, 7–8 April 2005). Glasgow, 2005. P. 1–9.
15. Agrawal R., Bharradwaj S.K., Kothari D.P. An Educational and Professional Simulation Tools in Power Systems and FACTS controllers – «An Overview» // International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering. 2013. Vol. 2. Issue 2. P. 91–96.
16. Multi-time-step and multi-core simulations // EMTP

[Электронный ресурс]. URL: https://www.emtp-software.com/page/fmi-options?q=page/fmi-options (15.03.2019).
17. Гусев А.С., Хрущев Ю.В., Гурин С.В., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем // Электричество. 2009. № 12. С. 5–8.
18. Akhmatov V., Nielsen A.H., Pedersen J.K., Nymann O. Variable-Speed Wind Turbines with Multi-Pole Synchronous Permanent Magnet Generators. Part I: Modelling in Dynamic Simulation Tools // Wind Engineering. 2003. Vol. 27. Issue 6. P. 531–548. https://doi.org/10.1260/030952403773617490
19. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1985. 169 с.
20. Dehkordi A.B., Gole A.M., Maguire T.L. Permanent Magnet Synchronous Machine model for Real-Time Simulation // International Conference on Power System Transients (Montreal, 19–23 June 2005). Montreal: IEEE, 2005. P. 1–6.

References

1. Muljadi E, Yin Cheng Zhang, Gevorgian V, Kosterev D. Understanding dynamic model validation of a wind turbine generator and a wind power plant. In: *Energy Con-version Congress and Exposition (ECCE).* 18–22 September 2016, Milwaukee. Milwaukee: IEEE; 2016, p. 1–5. https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7855542
2. Ayuev BI, Gerasimov AS, Esipovich AH, Kulikov YuA. Verification of unified energy system/United energy system digital models. *Elektrichestvo* = Electricity 2008;5:2–7. (In Russ.)
3. Gerasimov AS, Esipovich AH, Smirnov AN. Experience of verification of digital and physical models of electric power systems. *Elektricheskie stancii* = Electrical stations. 2010;11:14–19. (In Russ.)
4. Renewables 2018. *Global Status Report*. Available from: https://www.ren21.net/reports/global-status-report/ [Accessed 13th March 2019].
5. Annual Global Wind Report. *GWEC Global Wind Energy Council.* Available from: https://gwec.net/members-area-market-intelligence/reports/ [Accessed 13th March 2019].
6. Ackermann T. *Wind Power in Power Systems*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons; 2012, 1049 p. https://doi.org/10.1002/0470012684
7. The Rusnano Foundation and Fortum received the right to build 823 MW of wind power generation. *Rosnano*. Available from: http://www.rusnano.com/about/press-centre/news/20180613-rosnano-fond-razvitiya-vetroenergetiki-poluchil-pravo-stroitelstva-823-mvt-vetro generatsii [Accessed 15th March 2019].
8. Rosatom will use GE blades in wind energy projects. *RIA Novosti.* Available from: https://ria.ru/atomtec/20180513/1520441828.html [Accessed 15th March 2019].
9. The Grid Code. 2017;5:698. Available from: https://www.nationalgrid.com/sites/default/files/documents/8589935310-Complete%20Grid%20Code.pdf [Accessed 15th March 2019].
10. Hengdao Guo, Ciyan Zheng, Herbert Ho-Ching Iu, Fernando T. A critical review of cascading failure analysis and modeling of power system. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017;80:9–2. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.206
11. Negnevitsky M, Voropai N, Kurbatsky V, Tomin N, Panasetsky D. Development of an intelligent system for preventing large-scale emergencies in systems. In: *Power and Energy Society General Meeting.* 21–25 July 2013, Vancouver. Vancouver: IEEE; 2013, p. 1–5. https://doi.org/10.1109/PESMG.2013.6672099
12. Butcher JC. Numerical methods for ordinary differential equations. John Wiley & Sons. 2016:31–40 https://doi.org/10.1002/9781119121534
13. Hall D, Watt D. Modern numerical methods for solving ordinary differential equations, 1979, 312 p. (Russ. ed.: *Sovremennye chislennye metody resheniya obyknovennyh differencial'nyh uravnenij*. Moscow, Mir, 1979, 312 p.)
14. Lund T, Eek J, Uski S, Perdana A. Dynamic fault simulation of wind turbines using commercial simulation tools. In: *5th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms.* 7–8 April 2005, Glasgow. Glasgow; 2005, p. 1–9.
15. Agrawal R, Bharradwaj SK, Kothari DP. An Educational and Professional Simulation Tools in Power Systems and FACTS controllers – “An Overview”. International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering. 2013;2(2):91–96.
16. Multi-time-step and multi-core simulations. *EMTP*. Available from: https://www.emtp-software.com/page/fmi-options?q=page/fmi-options [Accessed 15th March 2019].
17. Gusev AS, Hrushchev YuV, Gurin SV, Svechkarev SV, Plodistyj IL. Electric power system real time all-mode modeling complex. *Elektrichestvo* = Electricity. 2009;12:5–8. (In Russ.)
18. Akhmatov V, Nielsen AH, Pedersen JK, Nymann O. Variable-Speed Wind Turbines with Multi-Pole Synchronous Permanent Magnet Generators. Part I: Modelling in Dynamic Simulation Tools. Wind Engineering. 2003;27(6):531–548. https://doi.org/10.1260/030952403773617490
19. Ledovskij AN. *Electric machines with highly coercive permanent magnets.* Moscow: Energoatomizdat; 1985, 169 p. (In Russ.)
20. Dehkordi AB, Gole AM, Maguire TL. Permanent Magnet Synchronous Machine model for Real-Time Simulation. In: *International Conference on Power System Transients.* 19–23 June 2005, Montreal. Montreal: IEEE; 2005, p. 1–6.

Критерии авторства

Разживин И.А., Рубан Н.Ю., Аскаров А.Б., Уфа Р.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Authorship criteria

Razzhivin I.A., Ruban N.Yu., Askarov A.B., Ufa R.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Разживин Игорь Андреевич,
ассистент отделения электроэнергетики
и электротехники,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
✉ e-mail: lionrash@tpu.ru

Рубан Николай Юрьевич,
кандидат технических наук,
доцент отделения электроэнергетики
и электротехники,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
e-mail: rubanny@tpu.ru

Аскаров Алишер Бахрамжонович,
инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории «Моделирование электроэнергетических систем»,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
e-mail: aba7@tpu.ru

Уфа Руслан Александрович,
кандидат технических наук,
доцент отделения электроэнергетики
и электротехники,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
e-mail: hecn@tpu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor A. Razzhivin,
Assistant Professor of the Department
of Power Industry and Electrical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia;
✉ e-mail: lionrash@tpu.ru

Nikolay Yu. Ruban,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Power Industry and Electrical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia;
e-mail: rubanny@tpu.ru

Alisher B. Askarov,
Research Engineer of the Research Laboratory
of Electric Power System Modeling,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia;
e-mail: aba7@tpu.ru

Ruslan A. Ufa,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Power Industry and Electrical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia;
e-mail: hecn@tpu.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.762.32 : 544.556.1
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-195-207

Исследование сплава системы W-C, полученного методом локального высокоэнергетического воздействия из шеелитового концентрата

© Д.И. Балахонов
Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Россия

Резюме: Цель – изучение химико-физических свойств твердого сплава, полученного из вольфрамсодержащего многокомпонентного минерального сырья Дальневосточного региона, методом локального высокоэнергетического воздействия – потоком ионизированной плазмы, удельная мощность которой > 10^4 – 10^5 Вт/см^2. Для изучения химического состава проб сплава системы W-C использовались методы рентгенофазового и спектрального микроанализов, а также сканирующая электронная микроскопия. Для определения микротвердости использовался микротвердомер ПМТ-3М, а для определения нанотвердости фаз сплава применялся модульный атомно-силовой микроскоп Ntegra Prima. Проведены исследования химического элементного и фазового составов проб сплава системы W-C, полученного методом локального высокоэнергетического воздействия на шихту, состоящую из шеелитового концентрата и графита. Рассмотрены экспериментальные зависимости количества полученных карбидов вольфрама от температуры плазменного потока T_p и времени его воздействия τ в камере синтеза, а также от количества введенного графита. Рассмотрены результаты спектральной и сканирующей электронной микроскопии образцов сплава, определены значения микротвердости и нанотвердости полученного сплава системы W-C. В ходе лабораторных испытаний проб экспериментального сплава выявлено, что сплав представляет собой твердый раствор, состоящий преимущественно из двух фаз – WC и W_2C. Полученный твердый раствор системы W-C обладает высокими показателями твердости (13…20 ГПа по Виккерсу) и износостойкости. Результаты исследований фазового состава твердого раствора системы W-C и его структуры позволяют предположить, что сплошной «скелет» карбидной фазы WC переплетается со «скелетом» фазы W_2C. Рассмотрена перспективность метода плазмохимического синтеза карбидов вольфрама из шеелитового концентрата для получения твердого раствора системы W-C.

Ключевые слова: шеелитовый концентрат, карбид вольфрама, плазмохимический синтез, энергия высокой плотности

Благодарности: Особую благодарность автор статьи выражает сотрудникам лаборатории Института тектоники и геофизики ДВО РАН (ИтИГ ДВО РАН, г. Хабаровск) за помощь, оказанную в проведении спектрального микроанализа образцов, а также сотрудникам кафедры «Прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Тихоокеанского государственного университета» за помощь в исследованиях нанотвердости фаз сплава.

Информация о статье: Дата поступления 16 сентября 2019 г.; дата принятия к печати 27 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Балахонов Д.И. Исследование сплава системы W-C, полученного методом локального высокоэнергетического воздействия из шеелитового концентрата. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 1. С. 195–207. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-195-207

Study of W-C system alloy obtained from scheelite concentrate by local high-energy impact method

Denis I. Balakhonov
Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to study the chemical and physical properties of a hard alloy obtained from tungsten-containing multicomponent mineral raw materials of the far East region by the method of local high-energy impact of the flow of ionized plasma, the specific power of which is > 10^4-10^5 W/cm^2. The methods of X-ray phase and spectral microanalysis, as well as scanning electron microscopy are used to study the chemical composition of W-C system alloy samples. The PMT-3M microhardometer is used to determine the microhardness. The Ntegra Prima modular atomic force microscope is used to determine the nanohardness of the alloy phases. The chemical elemental and phase com-

positions of samples of the W-C alloy obtained by the method of local high-energy impact on the charge consisting of scheelite concentrate and graphite are studied. Consideration is given to the experimental dependences of the amount of obtained tungsten carbides on the temperature of the plasma flow Tp and its action time τ in the synthesis chamber, as well as on the amount of graphite introduced. The results of spectral and scanning electron microscopy of alloy samples are examined. The values of microhardness and nanohardness of the resulting alloy of the system W-C are determined. Laboratory tests of experimental alloy samples have revealed that the alloy is a solid solution mainly composed of two phases: WC and W_2C. The obtained solid solution of W-C system features a high hardness (Vickers hardness number is from 13 to 20 GPA) and wear resistance. The study results of the phase composition of the W-C system solid solution and its structure suggest that the solid 'skeleton' of the WC carbide phase is intertwined with the 'skeleton' of the W_2C phase. The prospects of the method of plasma-chemical synthesis of tungsten carbides from scheelite concentrate for obtaining a solid solution of the W-C system are estimated.

Keywords: scheelite concentrate, tungsten carbide, plasma-chemical synthesis, high-density energy

Acknowledgments: The author expresses special gratitude to the staff of the laboratory of the Yu. A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics FEB RAS (ITIG FEB RAS, Khabarovsk) for the assistance provided in the spectral micro analysis of samples, as well as to the staff of the Applied Materials Science Department of the Pacific National University for the assistance in research of the alloy phase nanohardness.

Information about the article: Received September 16, 2019; accepted for publication December 27, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Balakhonov DI. Study of W-C system alloy obtained from scheelite concentrate by local high-energy impact method. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):195–207. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-195-207

1. ВВЕДЕНИЕ

Получение новых и качественных конструкционных керамических материалов, основой композиции которых служат неорганические соединения металлов и неметаллов с бором, углеродом или азотом (например, карбиды, бориды, нитриды), является важной задачей для промышленного комплекса страны. Данные соединения широко используются в машиностроительной отрасли при обработке металла давлением, в производстве микросхем, медицинского оборудования, деталей авиакосмической отрасли и т.д.

Между тем основной проблемой для получения качественных соединений остается сырьевая база тугоплавких металлов, в частности, минеральное сырье с высоким содержанием таких металлов как циркон, титан, ванадий, хром, молибден, вольфрам и т.д. Важно учитывать, что элементы W и Ti, которые наиболее часто применяются для получения твердых сплавов, расположены перед элементом Fe в Периодической системе химических элементов и в соединении с кислородом менее активны, чем элементы, расположенные после него: *Ti→Si→V→Mn→Cr→Mo→W→Fe* [1–3]. Данный фактор дополнительно осложняет процесс получения тугоплавких и твердых соединений, например, с углеродом или бором [2].

За последнее 20 лет темпы производства соединений на основе тугоплавких металлов выросли, в частности сплавов на основе карбидов вольфрама. Особенно это касается стран азиатского региона, где и производится основной объем изделий из сплавов на основе карбидов вольфрама. Наряду с этим, множество как зарубежных, так и отечественных ученых рассматривают вопрос повышения качества и скорости производства сплавов на основе W [4–11].

Новым направлением в области получения металлических и керамических материалов является комплексное использование шлиховых концентратов россыпных месторождений [12, 13, 18]. Попытки обоснования такого подхода к проблеме комплексного использования сырья предпринимались и ранее, например, в трудах В.А. Резниченко [12].

К главным преимуществам прямой переработки минерального сырья можно отнести существенное снижение стоимости процесса за счет исключения металлургических стадий, в ряде случаев – многостадийной обработки по обогащению руды, а также рациональное использование всех

компонентов рудных концентратов с получением гетерогенной композиции [14–17].

В качестве перспективного способа получения новых сплавов из многокомпонентных минеральных концентратов применяется метод, основанный на воздействии концентрированными потоками энергии, удельная мощность (g) которой составляет > 10^4 – 10^5 Вт/см^2 (ионизированным излучением).

Целью исследований является изучение свойств твердого сплава на основе вольфрама, полученного из вольфрамсодержащего многокомпонентного минерального сырья методом высокоэнергетического воздействия – потоком ионизированной плазмы, при $g > 10^4 – 10^5$ Вт/см^2.

Для достижения заданной цели решались следующие задачи:

1) разработка способа получения соединений системы W-C (химическое соединение вольфрама и углерода) и формирование сплава из многокомпонентного минерального сырья методом высокоэнергетического воздействия в закрытой камере реактора;

2) исследование основных химико-физических характеристик полученного сплава системы W-C в зависимости от граничных условий эксперимента.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения твердого сплава на основе вольфрамсодержащего минерального сырья применялся шеелитовый концентрат Лермонтовского месторождения Дальневосточного региона. В настоящее время шеелитовый концентрат в промышленности используется в основном для получения (извлечения) из него триоксида вольфрама. Таким образом, для извлечения WO_3 из концентрата важно точно знать его химический и фазовый состав, от этого зависит выбор металлургической переработки данного сырья. К наиболее распространенным способам извлечения можно отнести гидрометаллургические – с применением различных растворов кислот или щелочей [3]. К недостаткам практически всех методов извлечения триоксида вольфрама из вольфрамсодержащих концентратов можно отнести значительное ресурсо- и энергопотребление, а также сложность в утилизации и ликвидации отходов такого производства.

Таким образом, развитие технологий комплексного использования минерального сырья, в т.ч. и концентратов тугоплавких металлов, актуально и в настоящее время. Особенно это касается вольфрамсодержащего сырья Дальневосточного региона, являющегося малонасыщенным по ценным компонентам и труднообогатимым материалом. Фазовый состав концентрата приведен в табл. 1.

В качестве восстановителя и карбюризатора использовался углеродосодержащий материал – графитовый порошок, полученный из отходов электродов марки ЭГ (электрод графитированный) (Россия).

Особенность процесса получения твердого сплава на основе вольфрама из шеелитового концентрата заключается в том, что процессы нагрева, плавления, де-

Таблица 1

Фазовый состав шеелитового концентрата

Table 1

Sheelite concentrate phase composition

Содержание компонентов, % масс.								
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	CaO	MgO	Na_2O	K_2O
7,96	0,78	5,29	0,72	0,02	19,8	2,45	0,18	0,17
P_2O_5	As	TiO_2	WO_3	SO_3	H_2O	H_2O^{+*}	CO_2	–
4,9	0,45	0,25	55,4	0,1	0,68	1,56	0,43	–

Примечание: *+ вода конституционная, находится в кристаллической решетке минерала в виде ионов и оксония.

структуризации, синтеза соединений и охлаждения протекают в одном технологическом цикле. Нагрев осуществлялся ионизированной плазмой, температура которой достигала 8500 К. Такой процесс существенно отличается от традиционных методов получения карбидов тугоплавких металлов, где чаще всего требуется сложное вакуумное оборудование [10, 11, 19, 20]. Кроме того, в качестве материала был выбран не традиционно чистый (без посторонних примесей) WO_3, а многокомпонентный минеральный концентрат. Шихта подавалась в область высокотемпературного нагрева совместно с потоком газа. Такой способ доставки материала позволил сконцентрировать его в самой нагретой области плазменного потока на выходе из сопла. Схематично процесс доставки шихты в камеру синтеза и процесс формирования расплава представлены на рис. 1.

Кроме того, процесс подготовки шихты сопровождался ее механоактивацией в следующем соотношении: 90–65% – шеелитового концентрата и 10–35% – графита. Механоактивация производилась на планетарной мельнице РМ 400, где два компонента смешивались и загружались в чашу.

Фазовый анализ продуктов синтеза проводился на сканирующем электронном микроскопе «VEGA 3 LMH» (TESCAN, Чехия), оснащенном энергодисперсионным спектрометром «X-Max 80» (Oxford Instruments, Чехия). Фотографирование образцов и поиск микровключений проводились преимущественно в режиме обратно рассеянных электронов (BSE-детектор). При помощи указанного электронного микроскопа установлено, что фазы с более высоким средним атомным числом при получении изображения отражаются в контрасте более ярко по сравнению с фазами, у которых среднее атомное число меньше.

Фазовый анализ проводился с использованием просвечивающего электронного микроскопа ZEISS Libra-120 (Германия), оснащенного HAADF-детектором и энергетическим Ω-фильтром. Исследования проводились в двух режимах: на просвет темного поля и электронной микродифракции. Образцы для просвечивающей микроскопии подготавливались методом электролитической полировки и ионным травлением.

Состав шлака и синтезированного продукта изучался дифрактометром «Дрон 7» (Россия) с трубкой из Co на K_α-линии рентгеновского излучения со скоростью съемки 2º/мин.

Исследования нанотвердости фаз сплава проводились на оборудовании ЦКП «Прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки Российской Федерации в рамках госзадания (№ государственной регистрации 11.7213.2017/7.8 и № 11. 3014.2017/4.6.) [21].

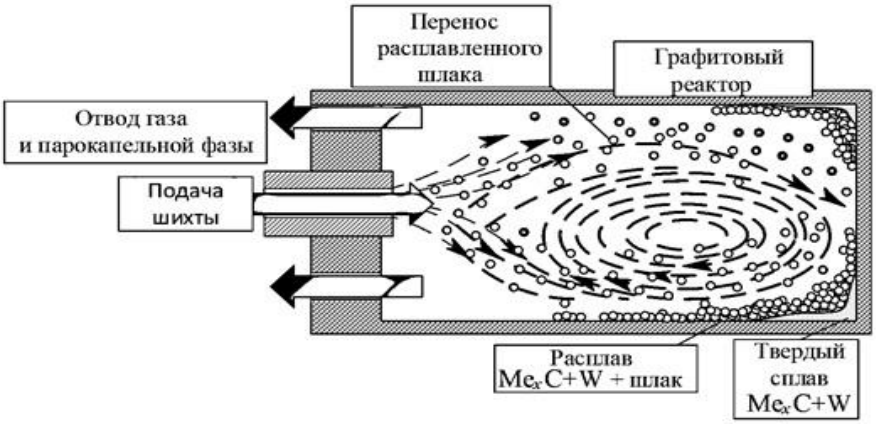


Рис. 1. Схема формирования капель сплава и шлака в камере синтеза
Fig. 1. Formation pattern of alloy and slag droplets in the synthesis chamber

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общеизвестно, что температура плавления вольфрама составляет 3695 К (3422°С), плотность – 19,25 г/см³, тогда как для карбида вольфрама – 3143К (2870°С) и плотность около 15,63 г/см³ [2]. В настоящей статье процессы синтеза протекают при температуре до 8,5 тыс. К, а процесс охлаждения материала практически мгновенный – до 2,5–3 тыс. К.

Исходя из указанного, близкие по значению основные термодинамические характеристики вольфрама и его соединений системы W-C позволяют использовать обе фазы для получения твердого сплава системы W-C, причем без участия дополнительных материалов (например, кобальта).

В процессе воздействия плазменным потоком на частицы шихты в закрытой камере реактора образуются зародышевые фазы карбидов типа WC – CaC – FeC и т.д., а также смесь газа. При дальнейшем охлаждении синтезированного материала зародышевые фазы увеличиваются и образуют кристаллы, сконденсированные в более холодных зонах реактора и на его стенках. Однако в более разогретой области камеры материал продолжает находиться еще в жидком состоянии и состоит из расплава металла и шлака, где более плотный и тяжелый металл осаждается на дно камеры.

Полученный расплав шлака (см. темную область на рис. 1) после остывания и кристаллизации подвергался дроблению. Исследуемый материал состоял из шлака и твердых легко отделяемых частиц вольфрамсодержащего сплава, в дальнейшем идентифицированного как твердый раствор системы W-C.

Предположено, что модель формирования полученного сплава системы W-C состоит из соединений группы Me_xC –W_2C – WC и восстановленного вольфрама в виде слоев, расположенных на стенке реактора, как представлено на рис. 2.

Важно отметить, что в силу более высокой плотности расплава металла часть шлака в процессе деструктуризации возгонялась и выводилась из камеры синтеза в виде смеси газа и нанодисперстных частиц.

В процессе исследований полученного сплава были определены его физико-химические характеристики и фазовый состав.

Доля шлака в сплаве распределена неравномерно, большая часть расположена ближе к поверхности сплава, что можно проследить при его обработке и подготовке из него микрошлифов. На глубине до 300–560 мкм от поверхности шлак практически не встречается.

Результат спектрального анализа образца сплава системы W-C представлен на рис. 3, а его химический состав – в табл. 2.

Фазовый анализ сплава показал наличие фаз WC и W_2C, а также восстановленный вольфрам. При детальном мик-

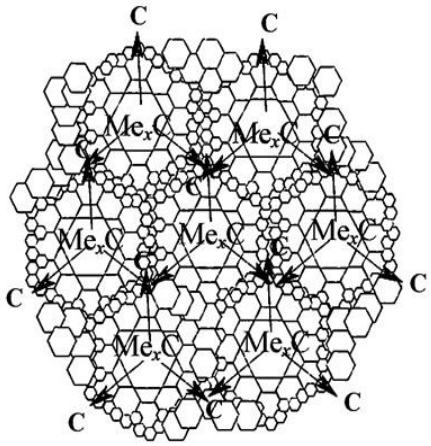


Рис. 2. Схема формирования сплава системы W-C
Fig. 2. W-C system alloy formation pattern

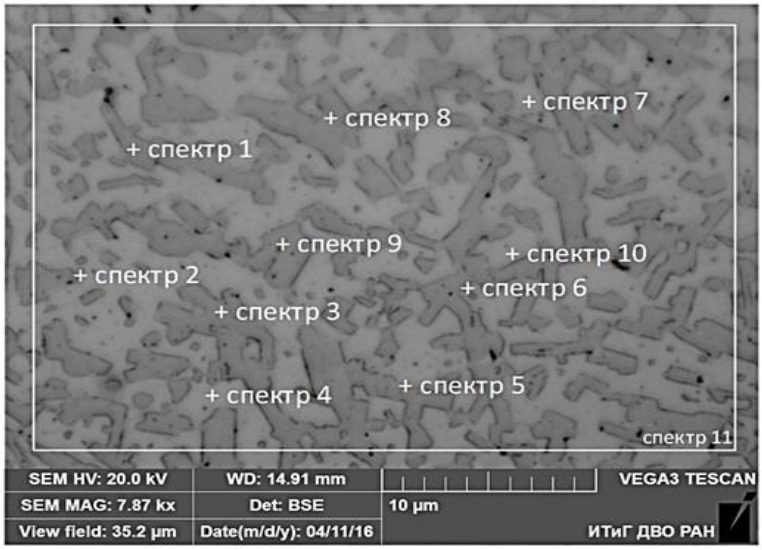


Рис. 3. Микротвердости шлифа и спектральный анализ сплава системы W-C
Fig. 3. Microhardness of the thin section and spectral analysis of the W-C system alloy

роанализе с использованием рентгеноспектральной и сканирующей электронной микроскопии было выявлено, что содержание углерода в фазах WC составило около 5,27–6,5 % масс. (50 ат. % – W и 50 ат. % – C), в фазах W_2C составило 3,65–4,97 % масс. (60 ат. % – W и 40 ат. % – C), а также выявлено незначительное количество восстановленного вольфрама, растворенного в виде твердой фазы в сплаве. Установлено, что среднее содержание углерода в сплаве составляет 5,66 % масс.

Рентгеноспектральный анализ полученного сплава подтвердил наличие двух фаз – WC и W C. Рентгенограмма шеелитового концентрата и полученного сплава системы W-C представлены на рис. 4.

Но важно отметить, что помимо вышеуказанных значений содержания углерода в сплаве были выявлены выпадающие из общей картины значения ат. % массы. Так, например, были получены результаты содержания вольфрама 84,67 ат. % – W, и 15,33 ат. % – C. Такие значения встречаются неоднократно, но среднее отклонение

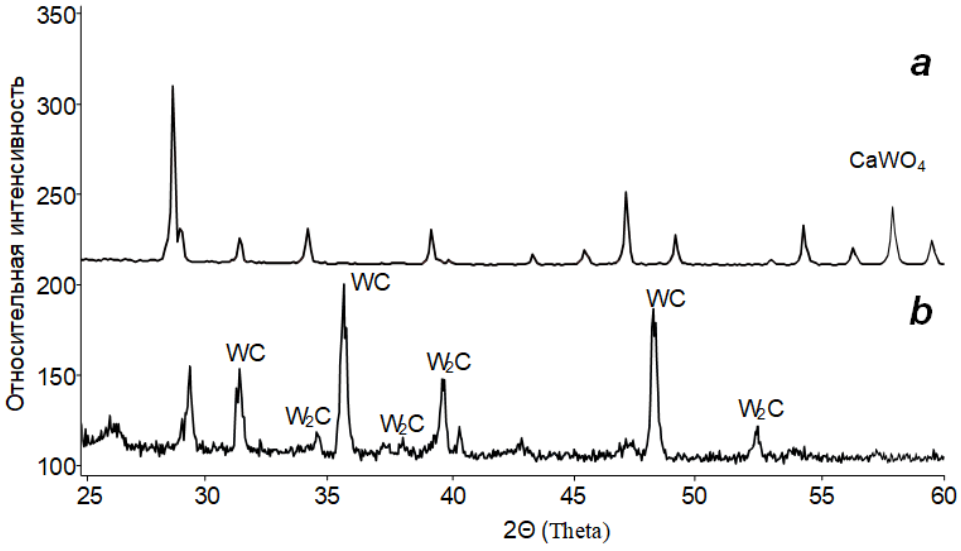


Рис. 4. Рентгенограмма шеелитового концентрата (a) и полученного сплава Me_xC – $(W)_xC$ (b)
Fig. 4. X-ray diffraction pattern of scheelite concentrate (a) and Me_xC – $(W)_xC$ (b) resulting alloy

значений ат. % для W и C не превышает ±10%. Из-за периодичности таких измерений было принято решение не принимать их за ошибку в дальнейших исследованиях. В ранних исследованиях автора[1] выдвигалась гипотеза о присутствии фаз Me_6C-W_6C в твердом растворе. Но в дальнейших исследованиях установлена связь, при которой происходит образование фаз Me_6C в структуре твердого раствора η-карбидов. К такому результату приводит наличие попутных 3*d*–6*d*-элементов (металлов), часто встречающихся в одном месторождении (например, шеелитовом): Sc, V, Cr, Mn, Fe и т.д. Таким образом, в твердом растворе, полученном в ходе плазмохимического синтеза карбидов вольфрама, также встречаются карбиды *η*-карбидов (M_3W_3C, M_6W_6C и т.д.), где M – *d*-металл.

По результатам исследованний, проведенных с использованием сканирующего электронного микроскопа (ZEISS Libra-120, Германия), установлено, что полученые образцы состоят преимущественно из двух основных фаз карбида вольфрама (WC и W_2C), имеют две кристаллографические модификации и представляют собой сплав в виде твердого раствора:

1) *α*-WC с гексагональной решеткой, имеющей периоды *a* = 0,2906 нм, *c* = 0,2839 нм, пространственная группа *P6m2*;

2) *β*-WC с кубической гранецентрированной решеткой (с периодом *a* = 0,4220 нм), пространственная группа *F m3m*, которая устойчива свыше 2525ºC [13], а также карбид дивольфрама W_2C, кристаллы которого образуют гексагональную сингонию со следующими параметрами ячейки: *a* = 0,29948 нм; *c* = 0,47262 нм; Z = 1.

Таким образом, предполагается, что сплав содержит преимущественно две гексагональные фазы (β-W_2C, δ-WC) и *α*-WC с гексагональной решеткой, также включенной в фазу карбида вольфрама (темная область рис. 3). Такая структура сплава обусловлена фазовым превращением в процессе закаливания расплава при температуре от 3 тыс. К. Результатом этого является разница температур потока плазмы, расплава и стенок камеры реактора, как в процессе нагрева, так и в момент его завершения (процесс прекращения подачи газа приводит к затуханию факела плазмы и дальнейшему остыванию камеры реактора и продуктов синтеза).

Таблица 2

Химический состав образца (см. рис. 3 справа)

Table 2

Chemical composition of the sample (see Fig. 3 on the right)

Спектры	Содержание, % масс.		
	W	C	Прочие элементы
1	94,28	5,64	0,08
2	94,28	5,71	0,01
3	93,85	6,13	0,02
4	95,01	4,97	0,02
5	93,81	6,18	0,01
6	93,22	6,76	0,02
7	94,65	5,33	0,02
8	94,71	5,27	0,02
9	93,02	6,96	0,02
10	96,33	3,65	0,02

[1]Балахонов Д.И. Разработка технологии получения тугоплавких металлов и их карбидов из минеральных концентратов в потоке низкотемпературной плазмы: дис. … канд. техн. наук: 05.16.09. Комсомольск-на-Амуре, 2019. 197 с.

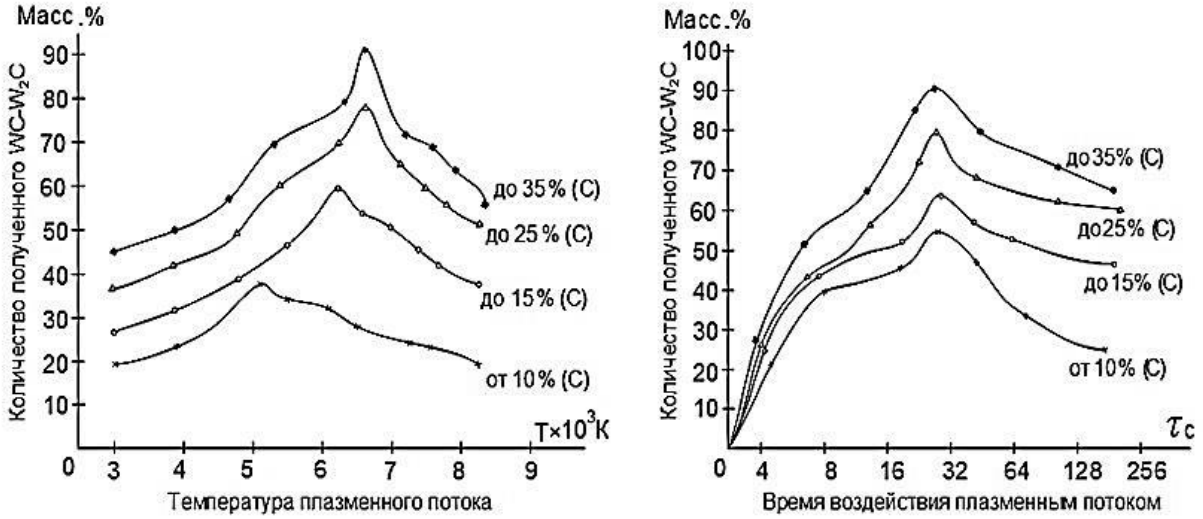
Процесс охлаждения расплава начинается от 2,7–3,2 тыс. К в зависимости от положения расплава относительно факела плазмы. Дальнейшее охлаждение расплава происходит в закрытой камере без доступа воздуха в атмосфере защитного инертного газа (аргона). Однако структура сплава отличается от ранее полученных и представленных в работах других авторов [2] более равномерной и однородной структурой расположения фаз WC и W_2C. Высказано предположение, что результатом такого формирования послужило накопление диспергированной фазы в процессе нагрева и синтеза соединений $Me_xC – W_2C – WC$.

В процессе формирования сплава важно учитывать количество прореагировавшего в расплаве углерода с вольфрамом (процесс карбидизации) и атомарного углерода, количество которого напрямую влияет на качество и свойства формируемого сплава. Важно отметить, что выполненная из графита камера реактора позволяет дополнительно получать атомарный углерод в процессе нагрева и синтеза соединений. Доля атомарного углерода в камере реактора от полного расчетного его количества составляет порядка 10–15%.

Выявлены зависимости количества получаемых карбидов вольфрама от температуры плазменного потока и времени его воздействия из шихты на основе шеелитового концентрата рис. 5.

Согласно зависимости (см. рис. 5 *a*) оптимальная температура плазменного потока для получения карбидов вольфрама составляет порядка 6500 К при содержании графита в шихте до 35%, первоначальная скорость охлаждения на выходе из факела плазмы предположительно составляет порядка 1,5–2 тыс. К/с до достижения температуры в 2,5–3 тыс. К, при дальнейшем повышении температуры плазменного потока более 6,5 тыс. К общий выход карбидов основного металла снижается. Наряду с этим происходит восстановление металла W как из карбидной фазы WC, так и из его оксидов $WO\text{-}WO_2\text{-}WO_3$.

Зависимость получаемых карбидов вольфрама от времени воздействия плазменным потоком на шихту из шеелитового концентрата при разном содержании графита (10–35%) представлена на рис. 5 *b*.



a *b*

Рис. 5. Зависимость полученного карбида вольфрама от количества введенного графита в шихту: a – температура плазменного потока, b – время воздействия плазменным потоком
Fig. 5. Dependence of obtained tungsten carbide on the amount of graphite introduced in the charge: a – plasma flow temperature, b – plasma flow exposure time

Согласно полученным зависимостям время воздействия (τ) плазменным потоком необходимо рассчитывать от общего объема, содержащегося в концентрате основного оксида металла таким образом, чтобы процесс приводил к полному синтезу всего объема карбидов вольфрама (зависимость на рис. 5 *b* рассчитана на 100 г шихты).

В дополнение важно отметить (см. рис. 3), что в светлой области, представленной фазой W_2C+W, также присутствует фаза WC, растворенная в виде наноструктурированных частиц.

Согласно полученным измерениям микротвердость карбидной фазы WC достигает 13…20 ГПа по Виккерсу при нагрузке идентера в 50 г, тогда как микротвердость фазы WC-W_2C-W_xC при той же нагрузке идентера – 10…13 ГПа.

Результаты измерений нанотвердости фаз полученного сплава представлены в табл. 3, а изображение фаз сплава WC-W_2C – на рис. 6.

Исследования нанотвердости фаз сплава показали, что фазы WC достигает 30…50 ГПа, а фазы W_2C – $(W)_xC$ – 20…30 ГПа при нагрузке идентора $20 \cdot 10^3$ мкН.

Количество шлаковой фазы составило порядка 2 % масс. В состав этой фазы входят карбиды попутных химических элементов концентрата $(Ca)_xC$ – $(Fe)_xC$. В исследованиях различных авторов, направленных на изучение физики и химии карбидов вольфрама, анализ которых приведен в [2], позволяет предположить, что присутствие кислорода, изначально входящего в состав концентрата и других химических элементов, в значительной степени влияет на изменение периода элементарной ячейки кубического карбида вольфрама (со структурой *B1*) [9].

Иными словами, попутные химические элементы, входящие в состав жидкой и газообразной фаз, образованные при высокотемпературном воздействии потоком плазмы, могут являться ингибиторами формирования и роста зерна для будущего сплава.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный в ходе плазмохимического синтеза карбидов вольфрама твердый раствор системы W-C из шихты на основе вольфрамосодержащих концентратов

Таблица 3

Показатели нанотвердости полученного сплава

Table 3

Nanohardness indices of the obtained alloy

№ индента	Площадь отпечатка, мкм^2	Нагрузка, мкН	Твердость, ГПа
1	0,625	20000	32,00
2	0,537	20000	37,24
3	0,589	20000	33,96
4	0,892	20000	22,42
5	0,429	20000	46,62
6	0,442	20000	45,25
7	0,35	20000	57,14
8	0,706	20000	28,33
9	0,643	20000	31,10
10	0,544	20000	36,76
11	1,05	20000	19,05
12	0,453	20000	44,15
13	0,733	20000	27,29
14	0,569	20000	35,15

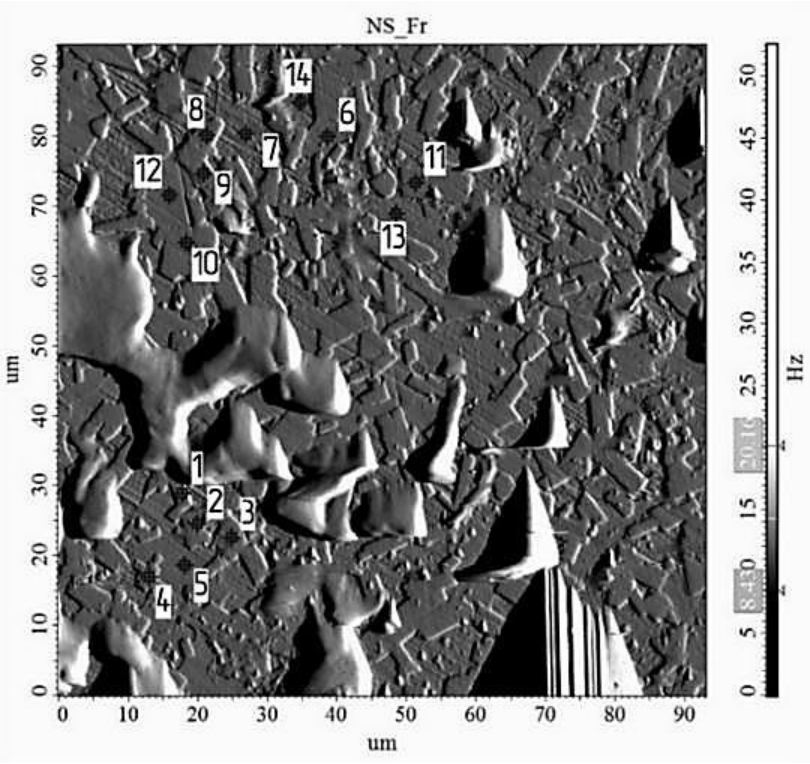


Рис. 6. Нанотвердость фаз твердого раствора WC-W_2C-W_xC
Fig. 6. Nanohardness of WC-W_2C-W_xC solid solution phases

имеет преимущественно двухфазный состав, состоящий из карбидов группы WC-W_2C. В сплаве присутствует незначительное количество восстановленного и растворенного вольфрама W и фазы MeW_6C. Полученный в результате локального высокоэнергетического воздействия твердый раствор системы W-C обладает высокими показателями твердости (13…20 ГПа по Виккерсу) и износостойкости. Результаты исследований фазового состава твердого раствора системы W-C и его структуры позволяют предположить, что сплошной «скелет» карбидной фазы WC переплетается со «скелетом» фазы W_2C. Результаты проведенных исследований в дальнейшем позволят прогнозировать химико-физические особенности сплава. Полученные результаты могут позволить применять плазменные технологии для получения твердых растворов из оксидов и сложно структурированных соединений тугоплавких металлов в качестве покрытий для металлообрабатывающего инструмента, коронок буровых установок и т.д.

Библиографический список

1. Ри Хосен, Ри Э.Х., Химухин С.Н., Гостищев В.В. Физико-химические и технологические основы синтеза металлов и сплавов на основе минеральных концентратов Дальневосточного региона // Научное обеспечение технического и социального развития Дальневосточного региона: сборник научных статей к 55-летию Тихоокеанского государственного университета (г. Хабаровск, 13–15 апреля 2013 г.). Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2013. С. 224–229.
2. Курлов А.С., Гусев А.И. Физика и химия карбидов вольфрама. М: Изд-во Физматлит, 2013. 272 с.
3. Агошков М.И. Развитие идей и практики комплексного освоения недр // Горный журнал. 1984. № 3. С. 3–6.
4. Konyashin I., Farag S., Ries B., Roebuck B. WC-Co-Re cemented carbides: Structure, properties and potential applications // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2019. Vol. 78. P. 247–253. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436818304876?via%3Dihub (17.08.2018). https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.10.001
5. Xingwei Liu, Xiaoyan Song, Haibin Wang, Xuemei Liu, Fawei Tang, Hao Lu. Complexions in WC-Co cemented carbides // Acta Materialia. 2018. Vol. 149. P. 164–178. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.02.018

6. Roebuck B., Moseley S. Tensile and compressive asymmetry in creep and monotonic deformation of WC/Co hard metals at high temperature // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2015. Vol. 48. P. 126–133. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436814002066?via%3Dihub (19.10.2019). https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.08.007
7. Jiwoong Kim, Yong Jae Suh, Ilmo Kang. First-principle calculations of phase stability and elastic and mechanical properties of η-phases in the WC - Co system // Journal of alloys and compounds. 2015. Vol. 656. P. 213–217. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.214
8. Roland H., Mario L., Reinhard P., Arnaud K., Ronald W. Evolution of conventional hard coatings for its use on cutting tools // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2017. Vol. 62. Part B. P. 210–218. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436816300324?via%3Dihub (15.09.2019). https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.05.009
9. Emanuelli L, Pellizzari M, Molinari A, Castellani F, Zinutti E. Thermal fatigue behaviour of WC-20Co and WC-30(CoNiCrFe) cemented carbide // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2016. Vol. 60. P. 118–124. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436816301925?via%3Dihub (15.09.2019). https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.06.014
10. Shuo Yin, Ekoi E.J., Lupton T.L., Dowling D.P., Lupoi R. Cold spraying of WC-Co-Ni coatings using porous WC-17Co powders: Formation mechanism, microstructure characterization and tribological performance // Materials & Design. 2017. Vol. 126. P. 305–313. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517303970?via%3Dihub (19.10.2019). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.04.040
11. Красильников В.Н., Поляков Е.В., Хлебников Н.А., Кузнецов М.В., Таракина Н.В. Нанодисперсный карбид вольфрама (WC) и углеродсодержащие нанокомпозиты (WC:NC): синтез, морфология, микроструктура // Химия твердого тела и функциональные материалы: матер. XI семинара «Термодинамика и материаловедение» (г. Екатеринбург, 20–23 сентября 2016 г.). Екатеринбург: Уральское отделение РАН. 2016. С. 184–186.
12. Резниченко А.А., Липихина М.С., Морозов А.А. Комплексное использование руд концентратов. М.: Наука, 1989. 172 с.
13. Хван А.Б., Колесников В.Г., Саттаров Г.С., Латышев В.Е., Урусова Е.В. Исследование возможности применения СВЧ поля для процессов рудоподготовки при получении золота // Горный вестник Узбекистана. 2002. № 2. С. 56–60.
14. Верхотуров А.Д. Некоторые методологические подходы к устойчивому развитию ресурсодобывающих регионов // Проблемы комплексного освоения георесурсов: материалы IV Всерос. науч. конф. с участием иностр. ученых (г. Хабаровск, 27–29 сентября 2011 г.). Хабаровск: ИГД ДВО РАН, 2011. Т. 2. С. 86–92.
15. Верхотуров А.Д., Шпилев А.М., Евсегнеев А.И. Основы материалогии. Владивосток: Дальнаука, 2012. 654 с.
16. Сергиенко В.И., Ри Хосен, Гостищев В.В., Мулин Ю.И., Ри Э.Х., Химухин С.Н. [и др.] Проблемы и перспективы эффективного использования минерального сырья Дальнего Востока для производства металлических материалов. Владивосток: Дальнаука, 2009. 192 с.
17. Туманов Ю.Н. Плазменные и высокочастотные процессы для получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее. М.: Физматлит, 2004. 760 с.
18. Курлов А.С., Гусев А.И. Вакуумный отжиг нанокристалических порошков WC // Неорганические материалы. 2012. Т. 48. № 7. С. 781–791.
19. Курлов А.С. Влияние вакуумного отжига на размер частиц и фазовый состав нанокристаллических порошков WC // Журнал физической химии. 2013. Т. 87. № 4. С. 664–671.
20. Благовещенский Ю.В., Исаев Н.В., Мельник Ю.И., Благовещенская Н.В. Спекание наноструктурных твердых сплавов // IV Всерос. конф. по наноматериалам «Нано-2011»: сб. материалов (г. Москва, 1–4 марта 2011 г.). Москва: ИМЕТ РАН. 2011. С. 15.
21. Крохин Н.С., Дорошенко К.В., Гончаров А.В., РИ Хосен, Ри Эрнст Хосенович. Исследование модифицированного никелем сплава ВАЛ10, химсостава и нанотвердости его структурных составляющих // Техника и технологии: пути инновационного развития: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. (Курск, 29–30 июня 2018 г.). Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2018. С. 168–171.

References

1. Ri Hosen, Ri EH, Himuhin SN, Gostishchev VV. Physico-chemical and technological foundations of metal and alloy synthesis based on mineral concentrates of the far East region. In: *Nauchnoe obespechenie tehnicheskogo i social'nogo razvitija Dal'nevostochnogo regiona: nauchnye stat'i k 55-letiju Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta* = Scientific support for the technical and social development of the Far East region: a collection of scientific articles on the 55th anniversary of the Pacific State University. 13–15 April 2013, Khabarovsk. Khabarovsk: Pacific State University; 2013, p. 224–229. (In Russ.)
2. Kurlov AS, Gusev AI. *Physics and chemistry of tungsten carbides*. Moscow: Fizmalit; 2013. 272 p. (In Russ.)
3. Agoshkov MI. Development of ideas and practices of

integrated subsoil development. *Gornyj zhurnal* = Mining Journal.1984;3:3–6. (In Russ.)
4. Konyashin I, Farag S, Ries B, Roebuck B. WC-Co-Re cemented carbides: Structure, properties and potential applications. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* 2019;78:247–253. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436818304876?via%3Dihub [Accessed 08th August 2018]. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.10.001
5. Xingwei Liu, Xiaoyan S, Haibin W, Xuemei Liu, Fawei T, Hao Lu. Complexions in WC-Co cemented carbides. *Acta Materialia*. 2018;149:164–178.
6. Roebuck B, Moseley S. Tensile and compressive asymmetry in creep and monotonic deformation of WC/Co hard metals at high temperature. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* 2015;48:126–133. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436814002066?via%3Dihub [Accessed 19th October 2019]. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.08.007
7. Jiwoong Kim, Yong Jae Suh, Ilmo Kang. First-principle calculations of phase stability and elastic and mechanical properties of η-phases in the WC - Co system. *Journal of alloys and compounds*. 2015;656:213–217. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.09.214
8. Roland HL, Mario P, Reinhard K, Arnaud V. Ronald Evolution of traditional hard coatings for their use on cutting tools. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2017;62(B):210–218. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436816300324?via%3Dihub [Accessed 15th September 2019]. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.05.009
9. Emanuelli L, Pellizzari M, Molinari A, Castellani F, Zinutti E. Characteristics of the thermal fatigue of cemented carbide WC-20Co and WC-30 (CoNiCrFe). *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2016;60:118–12. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436816301925?via%3Dihub [Accessed 15th September 2019]. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.06.014
10. Shuo Y, Emmanuel JE, Thomas LL, Denis PD, Rocco L. Cold spraying of WC-Co-Ni coatings using porous WC-17Co powders: Formation mechanism, microstructure characterization and tribological performance. *Materials & Design*. 2017;126:305–313. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/ article/pii/S0264127517303970?via%3Dihub [Accessed 19th October 2019]. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.04.040
11. Krasilnikov VN, Polyakov EV, Khlebnikov NA, Kuznetsov MV, Tarakina NV. Nanodispersed tungsten carbide (WC) and carbon-containing nanocomposites (WC: NC): synthesis, morphology, microstructure. In: *Himiya tverdogo tela i funkcional'nye materialy: mater. HI seminara «Termodinamika i materialovedenie»* = Chemistry of solids and functional materials. Proceedings of XI Seminar “Thermodynamics and Materials Science” Ekaterinburg, 20–23 September 2016, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Branch RAS; 2016, p. 184–186. (In Russ.)
12. Reznichenko AA, Lipikhina MS, Morozov AA. *Complex use of ore concentrates*. Moscow: Nauka; 1989. 172 p. (In Russ.)
13. Khvan AB, Kolesnikov VG, Sattarov GS, Latyshev VE, Urusova EV. Studying the possibility of using a microwave field for ore preparation under gold production. *Mining Journal of Uzbekistan*. 2002;2:56–60.
14. Verkhoturov AD. Some methodological approaches and technologies of stable development of recourse – mining regions. *Problemy kompleksnogo osvoeniya georesursov: materialy IV Vserossijskoj nauchnoj konferencii s uchastiem inostrannyh uchenyh* = Problems of complex development of georesources: Proceedings of IV All-Russian scientific conference with participation of foreign scientists. 27–29 September 2011, Khabarovsk. Khabarovsk: Institute of Mining of the far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences; 2011, vol. 2, p. 86–92. (In Russ.)
15. Verkhoturov AD, Shpilev AM, Evsegneev AI. *Fundamentals of materialology*. Vladivostok: Dal'nauka, 2012. 654 p. (In Russ.)
16. Sergienko VI, Ri Hosen, Gostishchev VV, Mulin YuI, Ri EH, Himukhin SN, et. al. *Problems and prospects of Far East mineral raw material effective use for production of metallic materials.* Vladivostok: Dal'nauka; 2009. 192 p. (In Russ.)
17. Tumanov YuH. Plasma and high-frequency processes for production and processing of materials in a nuclear fuel cycle: present and future. Moscow: Fizmatlit, 2004. 760 p.
18. Kurlov AS, Gusev AI. Vacuum annealing of WC nanocrystalline powders. *Neorganicheskiye materialy* = Inorganic Materials. 2012;48(7):781–791. (In Russ.)
19. Kurlov AS. The effect of vacuum annealing on particle size and phase composition of WC nanocrystalline powders. *Zhurnal fizicheskoj himii* = Journal of Physical Chemistry. 2013;87(4):664–671. (In Russ.)
20. Blagoveshchensky YuV, Isaev NV, Melnik YuI, Blagoveshchensky NV. Sintering of nanostructured hard alloys. In: *IV Vserossijskoj konferencii po nanomaterialam «Nano-2011»* = IV All-Russian Conference on nanomaterials “Nano-2011”. 1–4 March 2011, Moscow. Moscow: Institute of Metallurgy and Materials Science; 2011, p. 15. (In Russ.)
21. Krohin NS, Doroshenko KV, Goncharov AV, RI Hosen, Ri Ernst Hosenovich. Study of nickel modified alloy VAL10, its chemical composition and nanohardness of its structural components. In: *Tekhnika i tekhnologii: puti innovacionnogo razvitiya: nauchnye trudy VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* = Engineering and Technologies: Ways of Innovative Development: Collected scientific works of VII International scientific and practical conference 29–30 June 2018, Kursk. Kursk: South-West State University; 2018, p. 168–171. (In Russ.).

Критерии авторства

Балахонов Д.И. получил и оформил научные результаты и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Authorship criteria

Balakhonov D.I. has obtained and formalized the scientific results and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Балахонов Денис Игоревич,
кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры
транспорта железных дорог,
Дальневосточный государственный
университет путей сообщения,
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47, Россия;
✉ e-mail: d_balakhonov@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Denis I. Balakhonov
Cand. Sci. (Eng),
Senior Lecturer of the Department
of Railway Transport,
Far Eastern State Transport University,
47, Seryshev St., Khabarovsk 680021, Russia;
✉ e-mail: d_balakhonov@bk.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 669.04:666.76
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-208-219

Исследование влияния режима обработки стали ферросиликоалюминием на ее металлургические свойства

© А.З. Исагулов, Т.С. Макаев, Св.С. Квон, В.Ю. Куликов, Е.П. Щербакова
Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан

Резюме: Исследование и разработка технологии выплавки ферросиликоалюминия с использованием углистого сырья Куу-Чекинского угольного месторождения (Карагандинская область, Казахстан) преследует цель расширения сырьевой базы для выплавки нового вида комплексного сплава с всесторонним исследованием опытного сырья и его поведения в высокотемпературных условиях. Повышение спроса на рынке качественной металлопродукции заставляет искать новые виды ферросплавов и раскислителей, представляющих собой комплексные сплавы. Одним из эффективных комплексных сплавов является ферросиликоалюминий, использование которого при обработке стали способствует повышению ее качественных характеристик и снижению себестоимости. В статье приведены результаты исследования по определению влияния режима обработки стали ферросиликоалюминием марок ФС55А20 и ФС55А15 на металлургические свойства образцов стали. Плавку опытных образцов стали проводили в индукционной лабораторной печи УИП-25 с модернизированной системой охлаждения в слабоокислительной среде методом переплава. Изучалось влияние природы раскислителя на такие показатели металлургического качества стали как индекс загрязненности по неметаллическим включениям, природа неметаллических включений, степень химической ликвации, балл зерна. Использовались химический, микрорентгеноспектральный, микроструктурный анализы. Сравнение экспериментальных образцов позволяет утверждать, что при прочих равных условиях сплав марки ФС55А20, используемый при раскислении, оказывает более благоприятное влияние, чем сплав ФС55А15, на металлургическое качество стали по оцениваемым параметрам: средний балл зерна, степень ликвации, индекс загрязненности. Индекс загрязненности в случае раскисления сплавом ФС55А15 возрастает на 17%. Методом микрорентгеноспектрального анализа установлена природа неметаллических включений, которые представлены 4 группами: оксиды, сульфиды, силикаты и неидентифицированная фаза, доля которой колеблется в пределах 10–15%.

Ключевые слова: производство стали, ферросиликоалюминий, качество стали, металлографический анализ, неметаллические включения, раскислитель

Информация о статье: Дата поступления 22 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 19 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

***Для цитирования*:** Исагулов А.З., Макаев Т.С., Квон Св.С., Куликов В.Ю., Щербакова Е.П. Исследование влияния режима обработки стали ферросиликоалюминием на ее металлургические свойства. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2020. Т. 24. № 1. С. 208–219. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-208-219

Studying influence of steel treatment mode using ferrosilicoaluminum on its metallurgical properties

Aristotel Z. Issagulov, Talgat S. Makaev, Svetlana S. Kvon, Vitaliy Yu. Kulikov, Elena P. Shcherbakova
Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan

Abstract: The research and development of ferrosilicoaluminium smelting technology using carbonaceous raw materials from the Kuu-Chekinsky coal field (the Karaganda region, Kazakhstan) is aimed at the expansion of the raw material base for smelting a new type of a complex alloy with the comprehensive study of experimental raw materials and their behavior in high-temperature conditions. Increased demand in the market of high-quality metal products makes us look for the new types of ferroalloys and deoxidizers, which are complex alloys. Ferrosilicoaluminium is one of the most effective complex alloys, the use of which in the processing of steel improves its quality characteristics and reduces its cost. The article presents the study results on determining the effect of the treatment mode of steel with ferrosilicoaluminium of FS55A20 and FS55A15 grades on the metallurgical properties of steel samples. The latter have been smelted in an induction laboratory furnace UIP-25 with an upgraded cooling system in a weakly oxidizing medium

by remelting. The study is given to the influence of deoxidizer nature on the indicators of metallurgical quality of steel including the index of non-metallic inclusion contaminations, the nature of non-metallic inclusions, the degree of chemical liquation, and the grain score. The methods of chemical, electron microprobe, and microstructure analyses are used. Comparison of experimental samples suggests that, all other conditions being equal, the FS55A20 alloy used for deoxidation has a more favorable effect on the metallurgical quality of steel than the FS55A15 alloy according to the estimated parameters including the average grain score, the liquation degree, and the contamination index. In case of deoxidation with the FS55A15 alloy the contamination index increases by 17%. Using the method of electron microprobe analysis the nature of non-metallic inclusions represented by 4 groups including oxides, sulfides, silicates and an unidentified phase, the proportion of which varies within 10–15% has been identified.

Keywords: steel production, ferrosilicoaluminum, steel quality, metallographic analysis, non-metallic inclusions, deoxidizer

Information about the article: Received November 22, 2019; accepted for publication December 19, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Issagulov AZ, Makaev TS, Kvon SS, Kulikov VYu, Shchernakova EP. Studying influence of steel treatment mode using ferrosilicoaluminum on its metallurgical properties. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):208–219. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-208-219

1. ВВЕДЕНИЕ

Качество стали, независимо от способа ее производства, определяется многими параметрами: содержанием растворенных газов, наличием зональной и дендритной ликвации, наличием и природой неметаллических включений и т.д.[1] [1–7]. Уровень всех этих параметров определяет эксплуатационные свойства стали, причем во многих случаях соответствие получаемой стали требуемым металлургическим характеристикам является определяющим фактором. При большом содержании растворенных газов, высоком индексе загрязненности стали, значительной ликвации химических элементов последующая термообработка не приводит к улучшению свойств продукта. Особенно важным становится металлургическое качество стали при выплавке легированных сталей, т.к. сложный состав таких сталей приводит к следующим особенностям:

– широкому интервалу ликвидус-солидус, что обусловливает высокую степень ликвации как зональной, так и дендритной;

– образованию различных фаз внедрения, в том числе и нежелательных;

– формированию структуры с неоднородным по размеру зерном.

Одним из факторов, влияющих на металлургическое качество стали, является режим раскисления, в первую очередь – природа раскислителя.

В данном исследовании изучалось влияние природы раскислителя на такие показатели металлургического качества стали, как индекс загрязненности по неметаллическим включениям, природа неметаллических включений, степень химической ликвации, балл зерна.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследования – определение влияния режима обработки ферросиликоалюминием (ФСА), полученного из сырья Куу-Чекинского угольного месторождения (Карагандинская область, Казахстан), образцов стали на их металлургические свойства.

Плавку опытных образцов стали проводили в индукционной лабораторной печи УИП-25 (рис. 1) с модернизированной системой охлаждения в корундомуллитоциркониевом тигле в слабоокислительной среде методом переплава. Разливку направляли в промежуточные ковши, в которых проводили раскисление разными марками ферросплавов. Частицы ферро-

[1]Коротич В.И., Набойченко С.С., Сотников А.И., Грачев С.В., Фурман Е.Л., Ляшков В.Б. Начала металлургии: учебник для вузов. Екатеринбург: УГТУ, 2000. 392 с.

сплавов дисперсностью -0,5 мм вводили в ковши перед разливкой в количестве 3,5% масс. После охлаждения слитков из них вырезались образцы для дальнейших исследований.

На анализ были представлены образцы стали, раскисленной разными марками ферросиликоалюминия. Химические средние составы стали и раскислителя представлены в табл. 1.

Химический состав определяли не менее чем в 5 точках с помощью спектрометра Thermo NITON XL2-100G (США), в табл. 1 приведены усредненные значения.



Рис. 1. Общий вид плавильной индукционной печи УИП-25
Fig. 1. General view of UIF-25 smelting induction furnace

Таблица 1

Химические составы стали и раскислителей

Table 1

Chemical compositions of steel and deoxidizers

№ образца	Характеристика образца	Si	Al	Fe	Cr	Mn	Ti	Mo	C	Cu	Zr	S	P
1	сталь после раскисления ФС55А20	0,15	0,09	95,678	0,907	0,657	2,258	0,030	0,028	0,053	0,05	0,032	0,067
2	сталь после раскисления ФС55А15	0,08	0,056	96,373	0,93	0,63	1,67	0,032	0,031	0,045	0,041	0,034	0,078
3	ФС55А20	56,3	21,61	19,466	0,9	0,196	1,35	–	–	0,05	0,05	0,018	0,06
4	ФС55А15	52,91	15,36	29,316	0,92	0,21	1,14	–	–	0,023	0,034	0,022	0,065

ISSN 1814-3520

На анализ были представлены образцы стали, раскисленной разными ферросплавами (см. табл. 1) в количестве 3,5% масс. Из образцов были подготовлены металлографические шлифы для анализа матрицы и включений. Для исследований использовался металлографический микроскоп марки ALTAMI – МЕТ 5ДИК (Россия) с разными увеличениями, программное обеспечение (ПО) Thixomet Pro, дифрактометр X-PertPRO, база данных DIFFRAC plus SEARCH для обработки результатов и диагностики фаз.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Влияние природы ферросплава на химическую ликвацию. Для определения степени химической ликвации был проведен химический анализ матрицы в крайних точках образца в направлениях (010) и (001). Замеры химического состава проводились не менее чем в 10 точках, что позволяет говорить о корректности результатов.

Как известно, наиболее подвержены ликвации такие элементы как S, P, C и O [8]. В нашем исследовании степень ликвации оценивалась по содержанию S, P, C и Si. Использованные для раскисления ФСА имеют большие различия по содержанию алюминия и кремния, причем существует зависимость между соотношением кремния и алюминия.

Однако на основании ряда исследований [9–11] можно утверждать, что большая часть алюминия базируется не в матрице, а в неметаллических включениях типа Al_2O_3, в меньшей степени – в виде алюминатов, комбинированных фаз алюмосиликатов и др. Соответственно, логично предположить, что из перечисленных элементов большей ликвации будет подвержен кремний, чем алюминий, тем более что он обладает большей растворимостью в *α*-феррите.

На основании полученных данных по содержанию элементов в разных точках образца была построена диаграмма по степени ликвации элементов для образцов, раскисленных разными марками ферросплавов (рис. 2). Степень ликвации рассчитывалась следующим образом:

$$\gamma = 1 - \frac{M_1}{M_2},$$

где M_1 – среднеарифметические min и max значений концентраций; M_2 – среднеарифметическое значение по выборке из 10 значений.

На диаграмме степень ликвации приведена в процентах.

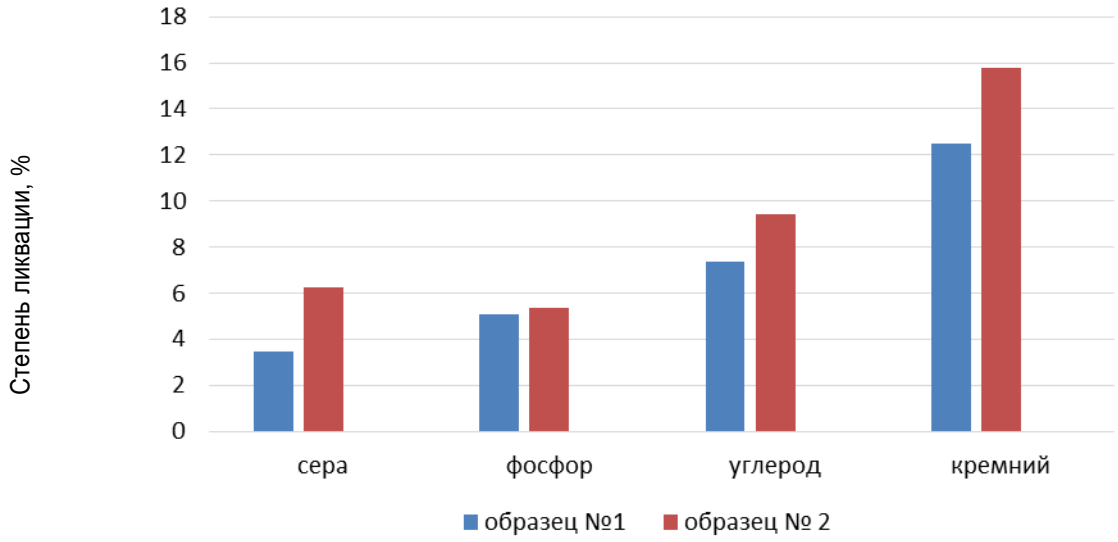
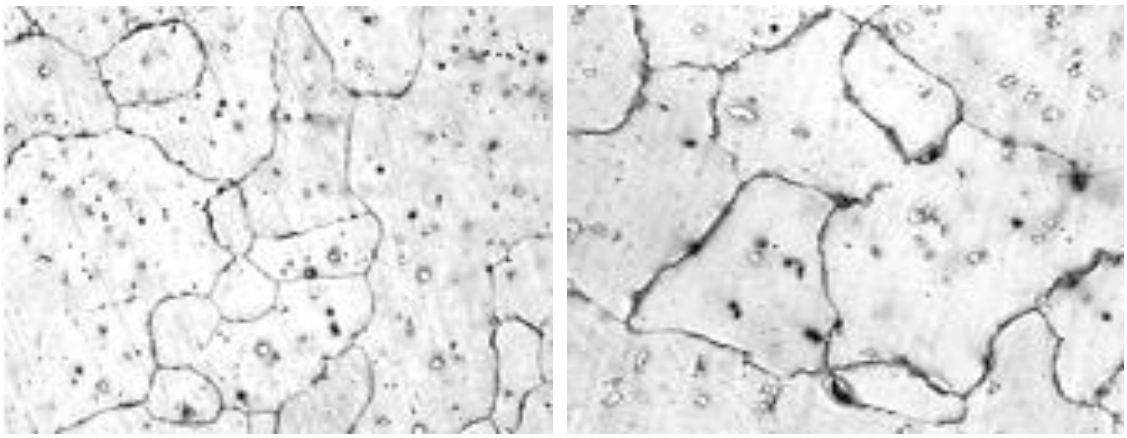


Рис. 2. Диаграмма степени ликвации элементов в разных образцах
Fig. 2. Diagram of element liquation degrees in different samples

Как видно из рис. 2, природа раскислителя оказывает влияние на распределение элементов в матрице. Особенно сильное влияние природа сплава оказывает на распределение серы (степень ликвации меняется почти в 2 раза), менее значительное – на ликвацию углерода и кремния (расхождение 20%), и практически не влияет на ликвацию фосфора. Природа этого влияния неясна, но очевидно, что это связано с фазовым составом ферросплава и коэффициентом диффузии данных элементов.

Металлографический анализ образцов проводится с целью изучения влияния химического состава и различных видов обработки на структуру металла [12]. Микроструктура образцов показана на рис. 3. Металлографический анализ проводили с помощью ПО Thixomet Pro не менее чем в 10 полях зрения. ПО Thixomet Pro позволяет оценивать средний диаметр зерна, количество зерен на единицу площади и соответствующий балл шкалы по ГОСТ 8233-56[2].

Анализировались образцы после первичной кристаллизации, раскисленные ФСА разных марок (см. табл. 1). Несмотря на то, что первичный размер зерна напрямую не влияет на эксплуатационные свойства сталей, он оказывает опосредованное влияние. Большой разброс в размере первичного зерна говорит о неравномерности теплоотвода и градиенте скорости образования центров кристаллизации по телу слитка. Эти факторы, в свою очередь, могут привести к ликвации и анизотропии свойств, которые не всегда нивелируются в процессе термической обработки. В табл. 2 показаны усредненные значения полученных экспериментальных данных.



a ***b***

Рис. 3. Микроструктура образцов: a – № 1; b – № 2, увеличение 500x
Fig. 3. Microstructure of samples: a – no. 1; b – no. 2, 500x magnification

Таблица 2

Данные металлографического анализа

Table 2

Metallographic analysis data

№ образца	Размер зерна, мкм	Количество зерен на 1 мм^2	Балл зерна
1	0,039	682	6–7
2	0,042	613	6–7

[2]ГОСТ 8233-56. Сталь. Эталоны микроструктуры. Введ. Комитетом стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров Союза ССР 01.07.1957, переизд. в 2004 г. М.: Изд-во стандартов, 2004.

Результаты металлографического анализа показывают, что при раскислении данными марками ФСА размер зерна примерно равный, балл зерна не меняется. Однако такой показатель как количество зерен на единицу площади различается на 10%, что при большой выборке данных является значимым результатом.

При более высоком среднем радиусе зерна в образце № 2 количество зерен на единицу площади меньше. Это свидетельствует о большой разнице в размере зерна в структуре образца № 2, зерно в структуре № 1 является более однородным. Это небольшое различие в показателях структуры имеет большое значение, т.к. определяет протяженность межзеренных границ, что, в свою очередь, влияет на уровень напряжений в теле слитка, механизм деформации и диффузии и т.д.

Более детальный металлографический анализ показал также разницу в дисперсности перлитообразной фазы (рис. 4).

В образце № 1 перлитообразная смесь имеет более высокую дисперсность, чем в образце № 2. Как известно, дисперсность перлита оказывает влияние на такие свойства как твердость и прочность, а также на ударную вязкость [13]. При более «грубой» перлитной матрице следует ожидать снижение ударной вязкости стали.

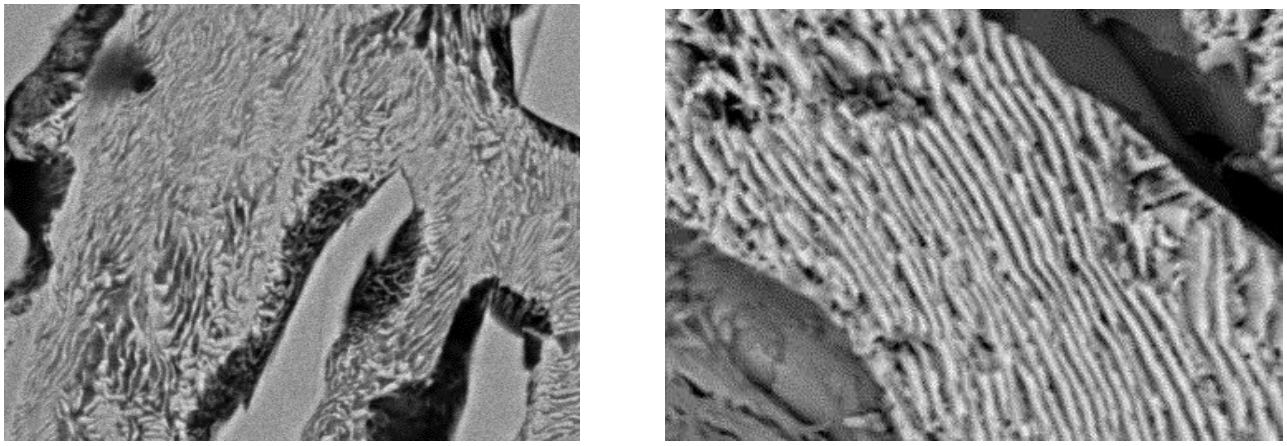
Анализ неметаллических включений в структуре. Количественный анализ неметаллических включений (НВ) также проводили с помощью ПО Thixomet Pro. Определяли количество неметаллических включений, на базе этого показателя рассчитывался индекс загрязненности НВ согласно ГОСТ 1778-70[3] по формуле:

$$I = \frac{b\sum a_i \cdot m_i}{l},$$

где b – цена деления окулярной шкалы при данном увеличении в мкм; a_i – среднее значение размеров включений в делениях окулярной шкалы; m_i – количество включений данной группы; l – длина подсчета в мкм. Данные приведены в табл. 3.

Индекс загрязненности в образце № 2 выше примерно на 17%, при этом природа включений не меняется.

Природа НВ влияет на металлургическое качество стали, т.к. включения разной природы имеют различную плотность, что сказывается на эффективности удаления их в процессе последующей обработки. Кроме того, природа неметаллического включения, как правило, определяет его форму [14–18].



a ***b***

Рис. 4. Микроструктура образцов: a – № 1; b – № 2, увеличение × 500
Fig. 4. Microstructure of samples: a – no. 1; b – no. 2, 500x magnification

Таблица 3

Данные о неметаллических включениях в исследуемых образцах

Table 3

Data on non-metallic inclusions in test samples

№ образца	Индекс загрязненности	Природа включений	Средний размер включений, мкм
1	1,67	Оксиды Сульфиды Силикаты Неопределенная фаза	0,533
2	2,02	Оксиды Сульфиды Силикаты Неопределенная фаза	0,617

Химический состав неметаллических включений определялся с помощью микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на рентгеновском дифрактометре «X-PertPRO» (Нидерланды). Для диагностики фаз использовалась база данных DIFFRAC plus SEARCH, которая позволяет однозначно идентифицировать большинство веществ [19, 20].

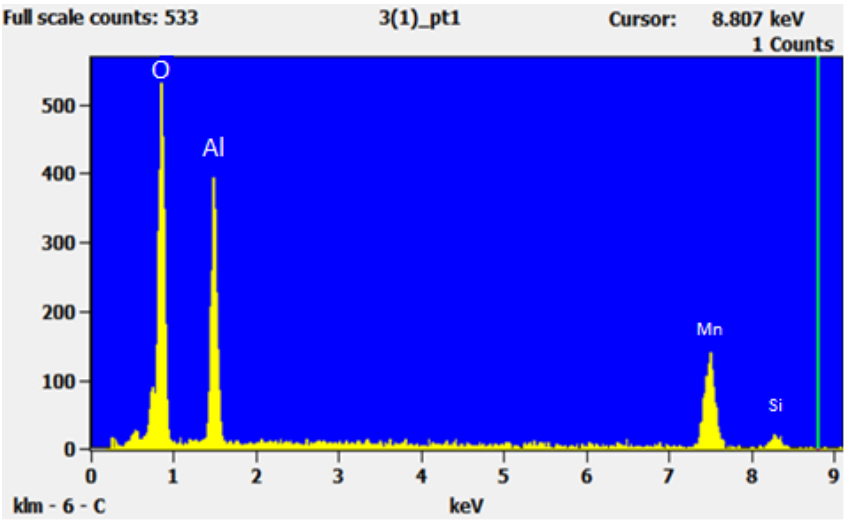
На рис. 5 представлены выборочные спектры неметаллических включений в исследуемых образцах. Большая часть включений идентифицирована как оксиды различных металлов, сульфиды (преимущественно железа), силикаты, а также присутствует небольшая доля неидентифицированной фазы. Предположительно, это комплексная фаза типа алюмосиликата по типу внедрения. Однако по базе данных DIFFRAC ее идентифицировать не удалось, более детальный рентгеноструктурный анализ с целью идентификации данной фазы не проводился.

Помимо химического состава НВ и определения индекса загрязненности ими, большое влияние на качество стали оказывает также и доля включений разной природы в общее количество НВ. Количественный анализ включений проводился также с помощью ПО Thixomet Pro. Данные по количественному анализу (доля вклада разных включений) представлены на рис. 6.

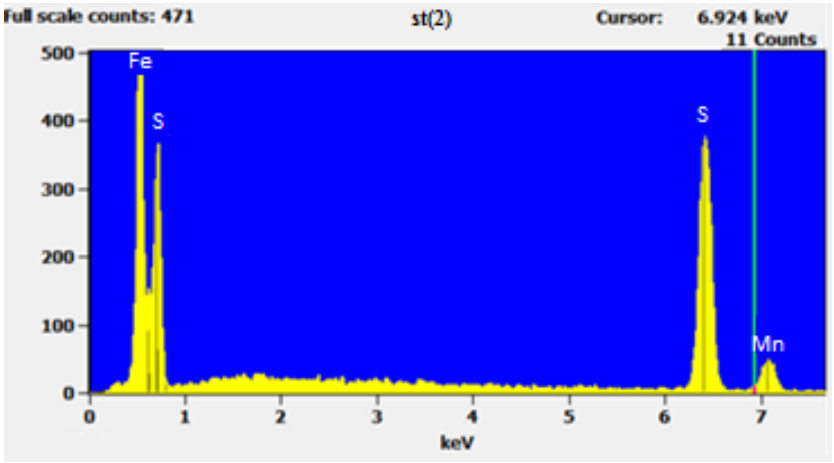
Сравнение построенных диаграмм распределения показывает, что в образце, раскисленном сплавом 2, возрастает доля силикатов, несколько снижается доля сульфидов и комплексной фазы, при этом доля оксидов практически не меняется. Увеличение доли силикатов в общем объеме неметаллических включений ожидаемо, т.к. сплав № 2 содержит большее количество кремния. Присутствие силикатов в качестве неметаллических включений нежелательно, т.к. эти включения обычно имеют форму тонких пластинок, иголочек и других форм с острыми краями, поэтому в сталях они играют роль концентраторов напряжений и могут привести к образованию усталостных микротрещин.

Кроме того, силикаты типа $SiO_2 \times FeO$, $SiO_2 \times MnO$ могут вести себя как хрупкие соединения, а могут проявлять себя как пластичная фаза. Такое поведение силикатов приобретает особое значение при прокатке и ковке, т.к. интервал размягчения силикатов лежит именно в этом температурном диапазоне. Поэтому при выборе режима раскисления и природы раскислителя необходимо принимать во внимание данное обстоятельство.

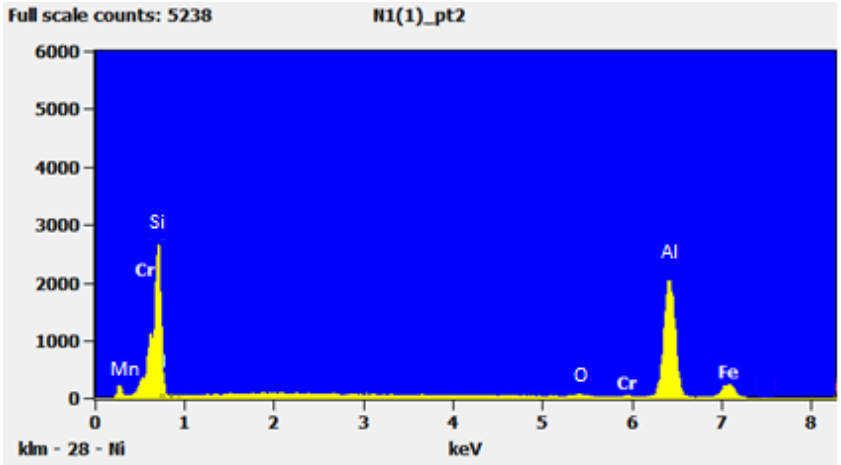
ISSN 1814-3520



a

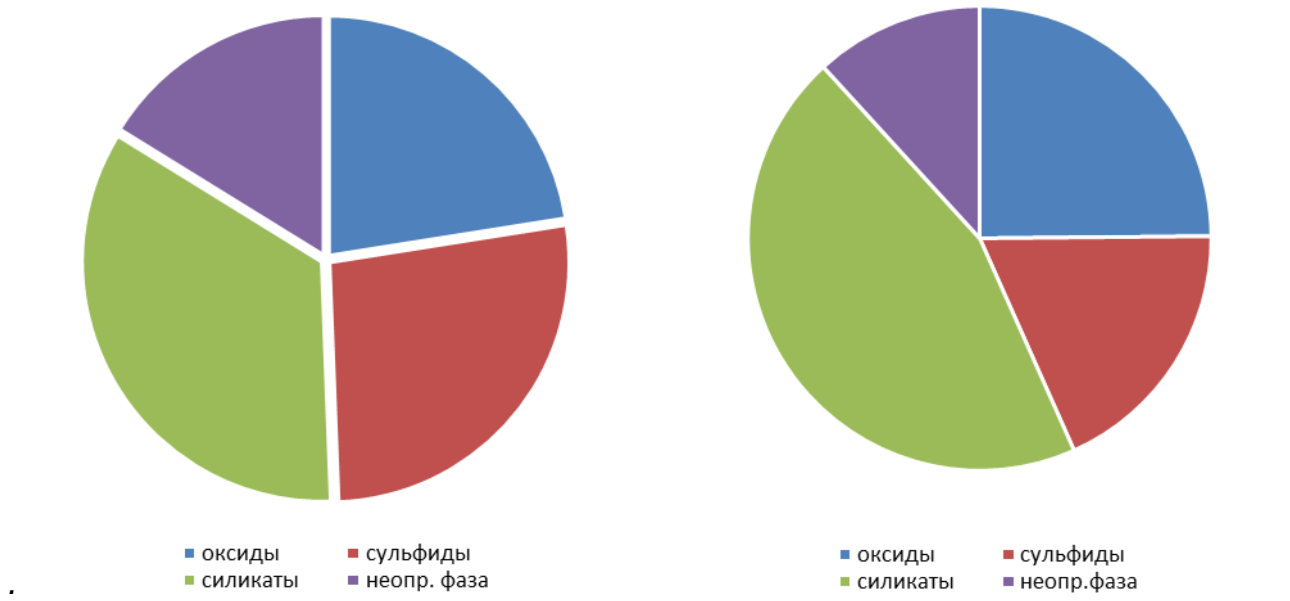


b



c

Рис. 5. Рентгенограммы неметаллических включений, обнаруженных в образцах № 1 и 2:
a – оксиды; b – сульфиды; c – силикаты
Fig. 5. X-ray patterns of non-metallic inclusions found in the samples no. 1 and no.2:
a – oxides; b – sulfides; c – silicates



a *b*

Рис. 6. Диаграмма распределения неметаллических включений: a – образец № 1; b – образец № 2
Fig. 6. Distribution diagram of non-metallic inclusions: a – sample no. 1; b – sample no. 2

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Определены параметры структуры: средний балл зерна, степень ликвации, индекс загрязненности. Установлено, что природа раскислителя оказывает влияние на степень ликвации (особенно по содержанию серы), природу неметаллических включений, но мало влияет на средний размер зерна.

2. Методом МРСА установлена природа неметаллических включений, которые представлены 4 группами: оксиды, силикаты, сульфиды и неидентифицированная фаза (доля последней колеблется в пределах 10–15%). В образце № 2 основная доля неметаллических включений представлена силикатами.

3. Сравнительный анализ экспериментальных данных по оценке основных параметров, отвечающих за металлургические свойства стали (степень ликвации, количество и характер неметаллических включений, индекс загрязненности, уровень напряжений), позволяет утверждать, что при прочих равных условиях сплав марки ФС55А20, используемый при раскислении, оказывает более благоприятное влияние, чем сплав ФС55А15 на изученные показатели металлургического качества стали по оцениваемым параметрам.

Библиографический список

1. Скребцов А.М., Кузьмин Ю.Д., Терзи В.В., Секачев А.О., Качиков А.С. Ликвация элементов в металлах – анализ расчетных формул, обобщение экспериментальных данных // Процессы литья. 2013. № 5. С. 41–47.
2. Issagulov A.Z., Kulikov V.Y., Chsherbakova Y.P., Kovaleva T.V., Kvon S.V. The corrosion resistant coating with halloysite nanoparticles // Metalurgija. 2016. Vol. 55. No. 3. P. 426–428.
3. Kulikov V.Y., Aubakirov D.R., Kvon S.S., Dostaeva A.M., Shcherbakova E.P. Use of wear-resistant materials in the Kazakhstan metallurgical industry // Metallurgist. 2019. Vol. 62. No. 9–10. P. 1068–1072. https://doi.org/10.1007/s11015-019-00755-5
4. Sukharev S.V., Kushnerev V., Korolev S.A., Kazakov S.V., Demin Yu.S. Improving the Out-of-Furnace Treatment of Wheel Steel by Using an Integrated Technology // Metallurgist. 2005. No. 49(3–4). P. 83–90. https://doi.org/10.1007/s11015-005-0058-2
5. Zhang Huining, Hui Li, Dong Jianhong, Xiong Huihui Optimization of the Stainless Steel Dust Briquette Reduction Process for Iron, Chromium, and Nickel Recov-

ery // High Temperature Materials and Processes. 2018. Vol. 37. Issue 8. P. 785–791. https://doi.org/10.1515/htmp-2017-0024
6. Kleinschmidt G. Trends and challenges for plant construction in the metal processing industry // Stahl und Eisen. 2015. No. 135. P. 116–120.
7. Li Wei, Jiang Wei-hang, Cao Song, Du Tian-bin, Zhang Jun-xin, Wang Nian-kang. Effect of Medium-Frequency Induction Furnace Deoxidization Technology on Nonmetallic Inclusion // Foundry. 2016. No. 2. P. 172–174.
8. Ведищева Н.М. Химическая природа ликвации. I. Бинарные системы // Физика и химия стекла. 2018. Т. 44. № 6S. С. 7–11. https://doi.org/10.1134/S0132665118070193
9. Бутенко В.И., Дуров Д.С., Шаповалов Р.Г. Влияние неметаллических включений и карбидов на структуру и свойства легированных сталей // Вопросы материаловедения. 2004. № 3. С. 19–27.
10. Шахпазов Е.Х., Зайцев А.И., Немтинов А.А., Зиченко С.Д., Родионова И.Г., Ефимов С.В., Рыбкин Н.А., Шапошников Н.Г. Современные направления развития ковшовой металлургии и проблема неметаллических включений в стали // Металлы. 2007. № 1. С. 3–13.
11. Зиборов А.В., Зырянов В.В., Кузнецов М.С., Кулагин С.А., Куклев А.В., Лонгинов А.М. Влияние технологии внепечной обработки на загрязненность стали неметаллическими включениями в условиях ОАО "Урал Сталь" // Металлург. 2008. № 3. С. 39–40.
12. Немчинова Н.В., Бузикова Т.А., Богданович А.Н. Металлографический анализ как эффективный способ контроля за качеством конечной продукции // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество: матер. XVII Всерос. науч.-практ. конф. (г. Новокузнецк, 8–11 октября 2013 г.). Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2013. С. 216–220.
13. Гетманова М.Е., Гриншпон А.С., Сухов А.В., Филиппов Г.А., Яндимиров А.А. Влияние неоднородности структуры и неметаллических включений на вязкость разрушения колесной стали // Сталь. 2007. № 9. С. 96–100.
14. Исагулов А.З., Куликов В.Ю. Вывод уравнения прессования песчано-смоляных смесей и их реологические модели // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2007. № 6. С. 52–56.
15. Исагулов А.З., Куликов В.Ю., Лорен К., Твердохлебов Н.И., Щербакова Е.П. Совершенствование литья по газифицируемым моделям // Литейное производство. 2014. № 4. С. 16–18.
16. Немчинова Н.В., Бузикова Т.А. Исследование фазово-химического состава печных шлаков кремниевого производства // Известия вузов. Цветная металлургия. 2017. № 1. С. 31–39. https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-31-39
17. Голубцов В.А., Воронин А.А., Тетюева Т.В., Рощин В.Е., Усманов Р.Г. Происхождение неметаллических включений и пути снижения загрязненности ими металла // Металлург. 2005. № 4. С. 73–77.
18. Немчинова Н.В., Тютрин А.А. Металлографическое исследование образцов алюминиевых рондолей // Фундаментальные исследования. 2015. № 3. С. 124–128 [Электронный ресурс]. URL: https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=37095 (11.10.2019).
19. Fuchs D., Schurer S., Tobie T., Stahl K. A model approach for considering nonmetallic inclusions in the calculation of the local tooth root load-carrying capacity of high-strength gears made of high-quality steels // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering science. 2019. Vol. 233. No. 21–22. P. 7309–7317. https://doi.org/10.1177/0954406219840676
20. Мухаметкалиев Е.К., Рощин В.Е., Байсанов С.О. Аналитическое выражение металлической системы Fe-Si-Al-Mn и фазовый состав алюмосиликомарганца // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 7. С. 564–571. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-7-564-571

References

1. Skrebtsov AM, Kuzmin YuD, Terzi VV, Sekachev AO, Kachikov AS. Liquation of elements in metals - analysis of calculation formulas, generalization of experimental data. *Processy lit'ja* = Casting Processes. 2013;5:41–47. (In Russ.)
2. Issagulov AZ, Kulikov VY, Chsherbakova YP, Kovaleva TV, Kvon SV. The corrosion resistant coating with halloysite nanoparticles. Metalurgija. 2016;55(3):426–428.
3. Kulikov VY, Aubakirov DR, Kvon SS, Dostaeva AM, Shcherbakova EP. Use of wear-resistant materials in the Kazakhstan metallurgical industry. *Metallurgist.* 2019;62(9-10):1068–1072. https://doi.org/10.1007/s11015-019-00755-5
4. Sukharev SV, Kushnerev IV, Korolev SA, Kazakov SV, Demin YuS. Improving the Out-of-Furnace Treatment of Wheel Steel by Using an Integrated Technology. Metallurgist. 2005;49(3–4):83–90. https://doi.org/10.1007/s11015-005-0058-2
5. Zhang Huining, Hui Li, Dong Jianhong, Xiong Huihui. Optimization of the Stainless Steel Dust Briquette Reduction Process for Iron, Chromium, and Nickel Recovery. High Temperature Materials and Processes. 2018;37(8):785–791. https://doi.org/10.1515/htmp-2017-0024
6. Kleinschmidt G. Trends and challenges for plant construction in the metal processing industry. Stahl und Eisen. 2015;135:116–120.
7. Li Wei, Jiang Wei-hang, Cao Song, Du Tian-bin, Zhang Jun-xin, Wang Nian-kang. Effect of Medium-Frequency Induction Furnace Deoxidization Technology on Nonmetallic Inclusion. Foundry. 2016;2:172–174.
8. Vedischeva NM. Chemical nature of segregation. I. Binary Systems. *Fizika i himija stekla* = Physics and

Chemistry of Glass. 2018;44(6S):7–11. (In Russ.) https://doi.org/10.1134/S0132665118070193
9. Butenko VI, Durov DS, Shapovalov RG. The influence of nonmetallic inclusions and carbides on the structure and properties of alloyed steels. *Voprosy materialovedenija* = Issues of Material Science. 2004;3(39):19–27. (In Russ.)
10. Shakhpazov EKh, Zaitsev AI, Nemtinov AA, Ziyachenko SD, Rodionova IG, Efimov SV, Rybkin NA, Shaposhnikov NG. Modern trends in the development of ladle metallurgy and the problem of nonmetallic inclusions in steel. *Metally* = Metals. 2007;1:3–13. (In Russ.)
11. Ziborov AV, Zyryanov VV, Kuznetsov MS, Kulagin SA, Kuklev AV, Longinov AM. Impact of technology of steel secondary metallurgy on metal impurity with nonmetallics in the conditions of JSC "Ural Steel". *Metallurg* = Metallurgist. 2008;3:39–40. (In Russ.)
12. Nemchinova NV, Buzikova TA, Bogdanovich AN. Metallographic analysis as an effective quality control method for the final product. In: *Metallurgiya: tekhnologii, upravleniye, innovatsii, kachestvo: materialy XVII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* = Metallurgy: technologies, control, innovation, quality: Proceedings of XVII Scientific and Practical Conference. 8–11 October 2013, Novokuznetsk. Novokuznetsk: SibSIU; 2013, p. 216–220. (In Russ.)
13. Getmanova ME, Grinshpon AS, Sukhov AV, Filippov GA, Yandimirov AA. Influence of structure heterogeneity and nonmetallic inclusions upon destruction toughness of wheel steel. *Stal'* = Steel. 2007;9:96–100. (In Russ.)
14. Issagulov AZ, Kulikov VYu. Establishing of naturally bonded molding tar-sand extrusion equation and their reologic models. *Izvestija vuzov. Chernaya metallurgija* = Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2007;6:52–56. (In Russ.)
15. Issagulov AZ, Kulikov VYu, Lourent Ch, Tverdokhlebov NI, Scherbakova EP. Improved method for producing cast billets casting method on gasified models. *Litejnoe proizvodstvo* = Foundry. Technologies and Equipment. 2014;4:16–18. (In Russ.)
16. Nemchinova NV, Buzikova TA. Study of the phase-and-chemical composition of silicon production furnace slags. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya* = Universities' Proceedings Non-ferrous Metallurgy. 2017;1:31–39. (In Russ.) https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-31-39
17. Golubtsov VA, Voronin AA, Tetyueva TV, Roshchin VE, Usmanov RG. Origin of non-metallic inclusions and means of decrease for metal contamination with them. *Metallurg* = Metallurgist. 2005; 4:73–77. (In Russ.)
18. Nemchinova NV, Tyutrin AA. Metallographic investigation of aluminum rondol samples. *Fundamental'nyye issledovaniya* = Fundamental Research. 2015;3:124–128. Available from: URL: https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=37095 [Accessed 11th October 2019]. (In Russ.)
19. Fuchs D, Schurer S, Tobie T, Stahl K. A model approach for considering nonmetallic inclusions in the calculation of the local tooth root load-carrying capacity of high-strength gears made of high-quality steels. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering science. 2019;233(21-22):7309–7317. https://doi.org/10.1177/0954406219840676
20. Mukhametkaliev EK, Roshchin VE, Baysanov SO. Analytical expressions for Fe – Si – Al – Mn metal system and phase composition of alumosilicomanganese. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* = Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2018;61(7):564–571. (In Russ.) https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-7-564-571

Критерии авторства

Исагулов А.З., Макаев Т.С., Квон Св.С., Куликов В.Ю., Щербакова Е.П. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Authorship criteria

Issagulov A.Z., Makaev T.S., Kvon S.S., Kulikov V.Yu., Shcherbakova E.P. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Исагулов Аристотель Зейнуллинович
доктор технических наук, профессор,
первый проректор,
Карагандинский государственный
технический университет,
100027, г. Караганда,
пр. Н. Назарбаева, 56, Казахстан;
e-mail: a.isagulov@kstu.kz

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aristotel Z. Issagulov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Karaganda State Technical University
of the First President of the Republic of Kazakhstan,
56, N. Nazarbaev Ave., Karaganda 100027,
the Republic of Kazakhstan,
e-mail: a.isagulov@kstu.kz

Макаев Талгат Саятович,
докторант,
Карагандинский государственный
технический университет,
100027, г. Караганда,
пр. Н. Назарбаева, 56, Казахстан;
e-mail: talgat.makayev@gmail.com

Квон Светлана Сергеевна,
кандидат технических наук,
профессор кафедры нанотехнологии
и металлургии,
Карагандинский государственный
технический университет,
100027, г. Караганда,
пр. Н. Назарбаева, 56, Казахстан;
e-mail: svetlana.1311@mail.ru

Куликов Виталий Юрьевич,
кандидат технических наук, профессор,
профессор кафедры нанотехнологии
и металлургии,
Карагандинский государственный
технический университет,
100027, г. Караганда,
пр. Н. Назарбаева, Казахстан;
e-mail: mlpikm@mail.ru

Щербакова Елена Петровна,
PhD,
старший преподаватель кафедры
нанотехнологии и металлургии,
Карагандинский государственный
технический университет,
100027, г. Караганда, пр. Н. Назарбаева, Казахстан;
✉ e-mail: sherbakova_1984@mail.ru

Talgat S. Makaev,
Doctoral Degree Student,
Karaganda State Technical University
of the First President of the Republic of Kazakhstan,
56, N. Nazarbaev Ave., Karaganda 100027,
the Republic of Kazakhstan,
e-mail: talgat.makayev@gmail.com

Svetlana S. Kvon,
Cand. Sci. (Eng.),
Professor of the Department
of Nanotechnology and Metallurgy,
Karaganda State Technical University
of the First President of the Republic of Kazakhstan,
56, N. Nazarbaev Ave., Karaganda 100027,
the Republic of Kazakhstan,
e-mail: svetlana.1311@mail.ru

Vitaliy Yu. Kulikov,
Cand. Sci. (Eng.),
Professor of the Department
of Nanotechnology and Metallurgy,
Karaganda State Technical University
of the First President of the Republic of Kazakhstan,
56, N. Nazarbaev Ave., Karaganda 100027,
the Republic of Kazakhstan,
e-mail: mlpikm@mail.ru

Elena P. Shcherbakova,
PhD,
Senior Lecturer of the Department of Nanotechnology and Metallurgy,
Karaganda State Technical University
of the First President of the Republic of Kazakhstan,
56, N. Nazarbaev Ave., Karaganda 100027,
the Republic of Kazakhstan,
✉ e-mail: sherbakova_1984@mail.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 681.542
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-220-230

Управление параметрами газовых горелок отражательных печей горения при плавлении никельсодержащего сырья

© В.Э. Кирос Кабасканго, В.Ю. Бажин
Санкт Петербургский горный университет, г. Санкт Петербург, Россия

Резюме: Цель – разработать и обосновать принципы энергетической модели промышленной отражательной печи с учетом химического состава и свойств природного газа, широко используемого в качестве топлива в металлургических процессах для обеспечения эффективной работы газопламенных печей в производстве чернового никеля. При сгорании природного газа в горелках газовых марок ГГСБ-1,4 и ГГСБ-2,2 (среднего давления с тепловой мощностью 1,4 МВт, расходом газа 140 м^3/ч и присоединительным давлением газа перед горелкой не более 40 кПа и номинальным давлением газа перед горелкой не более 20 кПа) всегда образуется углекислый газ и сажа, которые отрицательно влияют на ход технологического процесса. При высоком содержании водорода и углерода в составе газа изменяется тепловой баланс самого процесса плавки чернового никеля. Для изучения процесса горения природного газа различного состава, который происходит в горелках среднего давления, была использована компьютерная программа STANJAN с использованием для измерения давления – расходомера марки OPTISONIC 7300 на влажном газе, который подтвердил стабильную работу данного прибора при содержании жидкости в газе до 1% от объема газа. Измерение количества отходящих загрязняющих веществ определялось при помощи газоанализаторов марки MRU Delta 65-3, которые идентифицируют суммарное количество газов (O_2, CO, NO), а также температуру, давление (разряжение), рассчитывают содержание CO_2 и коэффициент полезного действия установки. Получено значение максимальной температуры продуктов сгорания и их соотношение к избыточным значениям в балансе в течение всего нагрева воздуха. Определены зависимости для оптимизации процесса автоматизации промышленных горелок при минимизации энергопотерь и выброса вредных веществ. На основании проведенных исследований были определены отрицательное влияние избытка воздуха на максимальную температуру продуктов плавки и положительный эффект предварительного нагрева воздуха при этой температуре. При поступлении воздуха с температурой при 50°C (вместо 25°C) температура пламени поднимается, что приводит к увеличению нагрева, добавляемого к нагрузке, и снижению энергопотребления процесса. Избыток воздуха и температура продуктов в тепловом процессе, основанном на сжигании природного газа, являются наиболее определяющими факторами в экологических и энергетических аспектах процесса.

Ключевые слова: производство никеля, отражательные печи, горелки, природный газ, состав отходящих газов, управление

Информация о статье: Дата поступления 25 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 26 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Кирос Кабасканго В.Э., Бажин В.Ю. Управление параметрами газовых горелок отражательных печей горения при плавлении никельсодержащего сырья. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2020. Т. 24. № 1. С. 220–230. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-220-230

Control of reverberatory furnace gas burner parameters under nickel-containing raw material melting

Valeria Esthefanía Quiroz Cabascango, Vladimir Yu. Bazhin
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract: The purpose of the reserch is to develop and justify the principles of the energy model of an industrial reverberatory furnace taking into account chemical composition and properties of natural gas, which is widely used as a fuel in metallurgical processes to ensure the efficient operation of open gas furnaces in the production of crude Nickel. Combustion of natural gas in the burners of the gas brands GGSB-1.4 and GGSB-2,2 (of medium pressure with the heat capacity of 1.4 MW, gas flow rate of 140 m^3/h and connecting gas pressure before the burner of not more than 40 kPa, nominal gas pressure before the burner of not more than 20 kPa) always results in the production of carbon dioxide and soot, which have an adverse effect on the process flow. High content of hydrogen and carbon in the gas changes the

thermal balance of the process of crude Nickel smelting. To study the combustion process of natural gas of different composition taking place in the burners of medium pressure the computer program STANJAN is used with the application of the wet gas-based flowmeter OPTISONIC 7300 for pressure measurement. The flowmeter confirmed the stable operation of the device when the liquid content in the gas is up to 1% of the gas volume. The amount of waste flue gases is measured using MRU Delta 65-3 gas analyzers, which identify the total amount of gases (O_2, CO, NO), temperature, pressure (vacuum), as well as calculate the content of CO_2 and plant efficiency. The value of the maximum temperature of combustion products and their ratio to the excess values in the balance during the entire heating of the air is obtained. The dependencies for industrial burner automation process optimization while minimizing energy losses and emission of harmful substances are determined. Conducted research allows to reveal the negative effect of excess air on the maximum temperature of melting products and the positive effect of air preheating at this temperature. When the air with the temperature of 50°C (instead of 25°C) arrives to the burner the temperature of flame rises, which increases the heat added to the load and reduces the energy consumption of the process. Excess air and product temperature in a thermal process based on natural gas combustion are the primary factors in the determination of environmental and energy aspects of the process.

Keywords: nickel production, reverberatory furnaces, burners, natural gas, flue gas composition, control

Information about the article: Received November 25, 2019; accepted for publication December 26, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Quiroz Cabascango VE, Bazhin VYu. Control of reverberatory furnace gas burner parameters under nickel-containing raw material melting. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):220–230. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-220-230

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в металлургических процессах, связанных с получением черновой меди и никеля, преобладают отражательные печи (ОП) с газовыми горелками. Мазутные и нефтяные горелки практически не используются в промышленности, в первую очередь из-за экологических проблем. Помимо экологических задач использование природного газа и его качество определяют эффективность работы печи, влияют на ее энергетический и материальный баланс, а также качество самого чернового никеля в случае перехода в него продуктов горения.

Решение задач рационального энергоснабжения металлургических агрегатов связано с серьезными проблемами ограничений в использовании ископаемого топлива и постоянного изменения цен на нефтепродукты. Эксплуатация природного газа в качестве чистого топлива по конкурентоспособным ценам выгодна с промышленной и коммерческой сторон.

Современные металлургические печи для плавки никеля, как правило, снабжены газовыми горелками среднего давления. Природный газ обладает целым рядом преимуществ для металлургического процесса:

1) дает за счет организации рациональных методов сжигания стабильно поддерживать в печи высокие температуры процесса;

2) при использовании газа появляются широкие возможности регулирования состава печной атмосферы с учетом химического состава самого источника;

3) при управляющем воздействии на такие параметры горелок как давление, температура пламени, расход природного газа можно эффективно воздействовать на процесс и тепловой баланс печи во время всего технологического цикла [1].

Учитывая эти особенности и характеристики процесса плавления шихты в ОП марки EMISON с газовыми горелками, в зависимости от условий горения природного газа и его химического состава, представляет собой научно-практический интерес разработка мероприятий, связанных с улучшением условий эксплуатации и повышения уровня автоматизации процесса [2, 3].

В данной работе изучен процесс сжигания природного газа в различных условиях, которые влияют на технологические параметры процесса при получении никеля, такие как:

– температурный режим зависимости от теплового потенциала газов;

– изменения теплового баланса с учетом потерь тепла отходящих газов;

– рост температуры от скорости сгорания природного газа различного состава в горелках среднего давления (с тепловой мощностью 1,4 МВт, расходом газа 140 $м^3$/ч и присоединительным давлением газа перед горелкой не более 40 кПа и номинальным давлением газа перед горелкой не более 20 кПа) марок ГГСБ-1,4 и ГГСБ-2,2;

– изменение состава отходящих газов в зависимости от условий плавки и подачи воздуха (соотношение воздух-топливо);

– изменение температуры расплава в зависимости от теплотворной способности газового топлива;

– соотношение температур отходящих газов с температурой расплава в различных условиях плавки [4].

Полученные результаты могут быть использованы как инструмент в принятии решений как с точки зрения улучшения показателей плавки, так и снижения экологической нагрузки на территории вблизи металлургических предприятий. Во всех термодинамических и химических расчетах использовалась компьютерная программа STANJAN и учитывалась диссоциация продуктов и полупродуктов сгорания топлива при взаимодействии с элементами шихты как в газообразном, так и жидком состояниях [5].

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Для анализа процесса горения газа в лабораторной печи был выбран метан, который подавался в горелки в присутствии воздуха (кислорода и азота). Выбранные условия соответствуют плавлению шихты до максимальной температуры 1550˚С, при предварительном нагреве воздуха от 150˚С до 950˚С и давлении газа в горелках ГГСБ-1,4: 50,66–121,59 кПа.

Известно, что максимальной температурой, которой могут достичь продукты сгорания, является адиабатическая температура пламени горелки, необходимая для нагрева в случае если все тепло, выделяемое во время процесса производства никеля, используется как единое целое для нагрева продуктов. Процедура расчета температуры адиабатического пламени (с учетом явлений диссоциации) осуществляется путем итерации температуры продуктов по следующему выражению:

$$H_{реагенты} = H_{продукты}, \quad (1)$$

где H – энтальпия, кДж.

В уравнении (1) $H_{реагенты}$ относят к энтальпии топлива и воздуха, которые являются частью процесса сгорания природного газа. При этом вся энергия используется для повышения температуры паров сгорания без потерь тепла в окружающую среду, продукты будут иметь энтальпию $\left(H_{продукты}\right)$, равную энтальпии реагентов, и, следовательно, нагреваются до максимально допустимой температуры процесса чернового никеля.

Для анализа отходящих газов и контроля атмосферы печи использовали газоанализатор MRU Delta 65-3, который может быть использован как дополнительный прибор для измерения CO, NO, SO_2, H_2S со встроенным сенсором только для контроля O_2.

На рис. 1 показано изменение температуры продуктов сгорания в зависимости от избытка воздуха при сгорании топлива. Очевидно, что максимальная температура имеет место при условии интенсивного перемешивания или 3% содержания воздуха. Если адиабатическая температура пламени горелки обычно связана со стехиометрическим состоянием или нулевым избытком воздуха, то для реального условия диссоциации более крупных молекул (CO_2, H_2O, O_2, N_2) и образования более мелких (CO, HO, NO, NO_2 и др.) максимальная адиабатическая температура наблюдается в обогащенной смеси, поскольку удельная теплоемкость продуктов сгорания уменьшается, что позволяет повысить температуру плавления [6, 7].

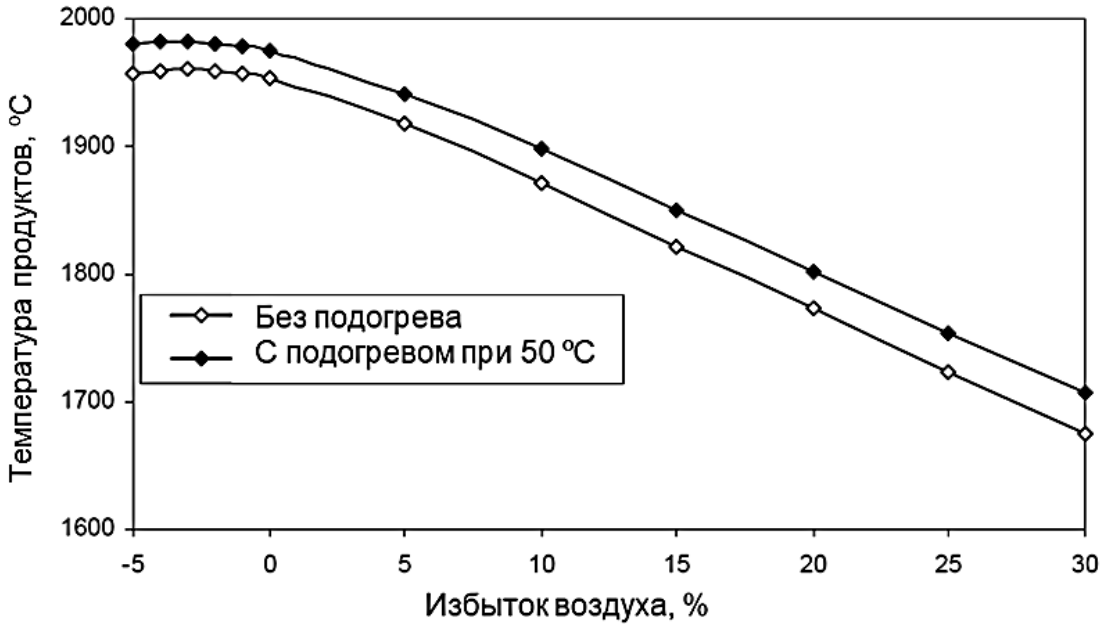


Рис. 1. Влияние избытка воздуха и его предварительного нагрева на температуру продуктов сгорания
Fig. 1. Effect of excess air and its preheating on combustion product temperature

Следует отметить, что влияние предварительного нагрева воздуха для эффективного горения происходит в период, когда воздух поступает не при 25°С, а при 50°С. При этом температура пламени увеличивается, что приводит к увеличению нагрева, добавляемого к нагрузке, и снижению энергопотребления процесса в целом.

Не менее важным показателем является количество воздушной смеси, подаваемой на горение, поэтому контролируемым параметром для автоматизации процесса может быть значение избытка воздуха, т.к. чрезмерное его увеличение вызывает резкое падение температуры пламени и всего процесса плавления.

Дополнительное тепло может повысить температуру плавления, что является наиболее важным фактором, влияющим на эффективность основных технологических операций в газовых печах; температура определяет качество будущего продукта, эффективность многостадийных процессов рафинирования в никелевой ванне во время процесса плавления, а также интенсивность насыщения газом плавления, его закупорки примесями и непоправимыми потерями ценных компонентов.

3. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ПРОЦЕССА

Продукты сгорания метана имеют определенный потенциал тепловой энергии в зависимости от их температуры [8]. Эта энергия или тепло *Q*, представленное как количество энергии, которое может быть преобразовано в полезную энергию при переходе газообразных продуктов сгорания в различные соединения в процессе нагрева, указывает на эффективное использование тепловой энергии газа в горелках [9]. При этом доступное для проведения процесса плавления шихты тепло определяется как

$$Q_{доступное} = GCV - Q_{газы}, \quad (2)$$

где *GCV* – наивысшая теплотворная способность топлива; $Q_{газы}$ – энергия, содержащаяся в печных газах, равная энтальпии продуктов сгорания при интересующей температуре, минус энтальпия продуктов (при 298,15 К). В дан-

ном случае природный газ характеризуется как метан CH_4, который имеет более высокую теплотворную способность, равную 55528 кДж/кг. Состав природного газа, в соответствии с проведенными исследованиями, приведен в таблице [10].

Состав природного газа
Natural gas composition

Компонент	Формула	Состав, % масс.
Метан	CH_4	95,08
Этан	C_2H_4	2,14
Пропан	C_3H_8	0,29
Бутан	C_4H_{10}	0,11
Пентан	C_5H_{12}	0,04
Гексан	C_6H_{14}	0,01
Азот	N_2	1,94
Углекислый газ	CO_2	0,39

На рис. 2 показана взаимосвязь между избытком воздуха в горелке, температурой отходящих газов и расчетной теплотой процесса нагрева, причем последняя выражается в процентах от более высокого значения теплотворной способности, которая необходима для максимальной энергии процесса горения топлива.

Необходимо отметить, что при фиксированном избытке воздуха тепло уменьшается по мере повышения температуры газов, что указывает на то, что вся полезная энергия не извлекается из отходящих газов и сохраняет остаточное тепло, которое можно использовать в рекуператоре печи. Если температуру газов принять постоянной 600–650°С, то отмечается явное отрицательное влияние избытка воздуха, поскольку доступное тепло уменьшается, т.к. воздух, который дополнительно поступает на сгорание, потребляет часть преобразованной химической энергии.

Важным фактором снижения температуры продуктов и, следовательно, увеличения доступного тепла является установка рекуперации тепла. Обычно рекуператоры выполняют роль дополнительного энергетического источника тепла. Ограничением для снижения температуры паров является образование серной кислоты, но при использовании природного газа это неудобство не имеет значения.

Таким образом, эффективность горелки марок ГГСБ-1,4 и ГГСБ-2,2 связана с энергией экзотермических реакций процесса на всех стадиях производства чернового никеля, которая может быть преобразована в нагрев продуктов сгорания, если вся химическая энергия и потенциал топлива преобразуются в доступное для процесса тепло.

Если температура расплава и энтальпия $H_{реагенты}$, а также температура продуктов сгорания известны сразу на выходе из горелки [11], то содержащийся в ней энергетический потенциал $H_{продукты}$ и эффективность можно определить как

$$n = \frac{GCV - \left(H_{продукты} - H_{реагенты}\right)}{GCV} \cdot 100\%. \quad (3)$$

На рис. 3 показано изменение эффективности сгорания в зависимости от температуры газов непосредственно на выходе из горелки. Также очевидно, что при определенном избытке воздуха эффективность увеличивается при повышении температуры отходящих газов.

Это означает, что высокая температура продуктов сгорания непосредственно на выходе из горелки является показателем более низкого влияния потерь тепла из-за образования паров и диссоциации продуктов в газовом потоке, которые являются эндотермическими и сопровождаются тепловыми потерями в потоке пламени.

С другой стороны, при одинаковой температуре продуктов сгорания для различного избытка воздуха интерпретация выглядит следующим образом: сжигание без избытка воздуха природного газа с одинаковой теплотворной способностью указывает на то, что горелка работает более эффективно, поскольку избыточный воздух является дополнительной тепловой нагрузкой; при избыточном сгорании температура не достигает таких высоких уровней, как при стехиометрическом сгорании.

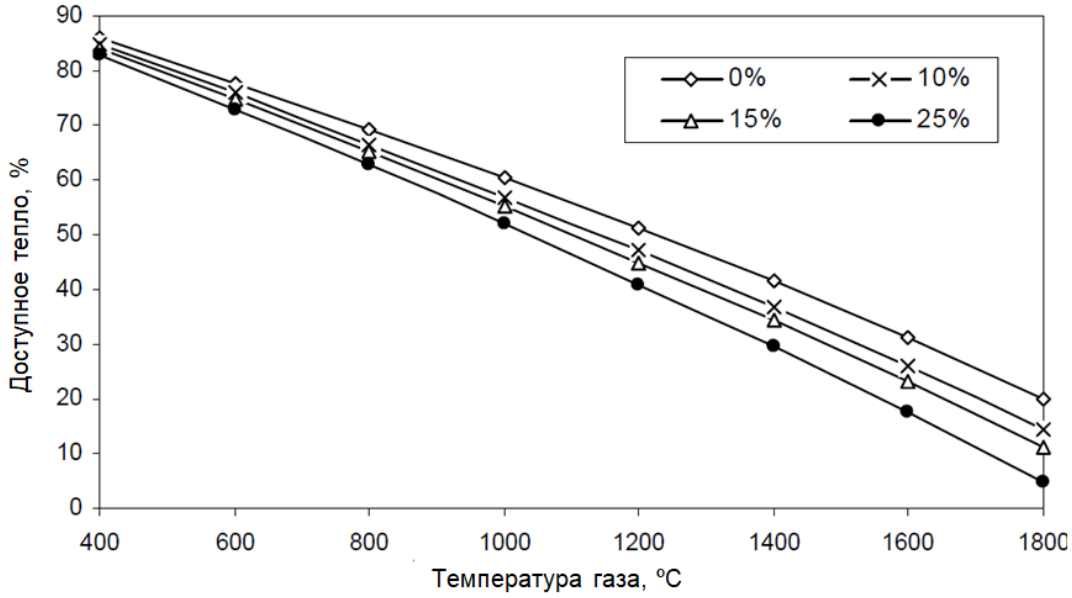


Рис. 2. Процент доступного тепла в зависимости от теплотворной способности как функции температуры отходящих газов и избытка воздуха
Fig. 2. Percentage of available heat depending on calorific value as a function of flue gas temperature and excess air

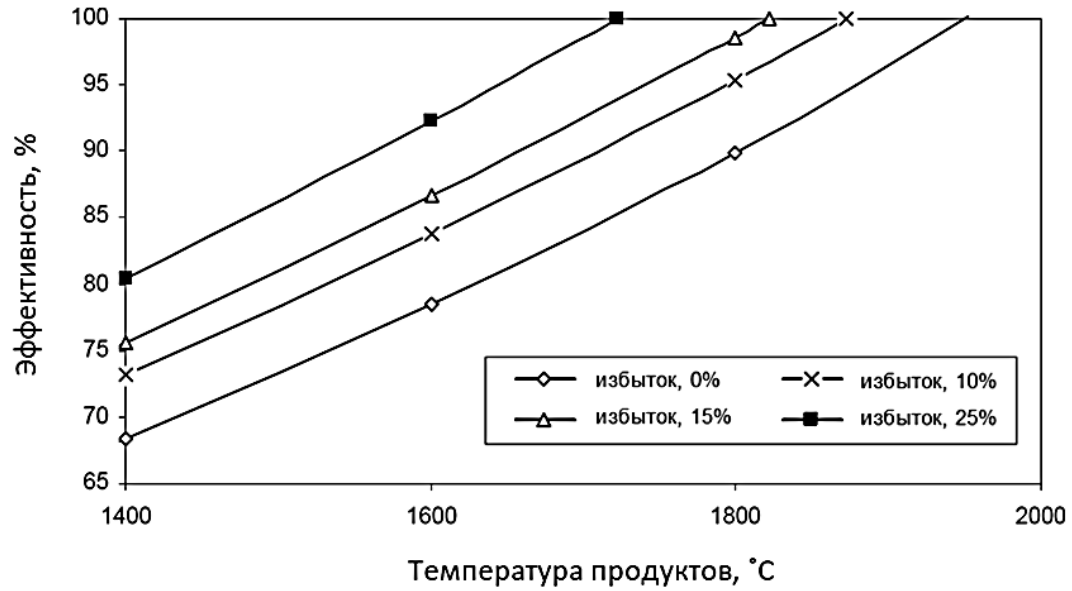


Рис. 3. Эффективность сгорания в зависимости от температуры расплава и избытка воздуха
Fig. 3. Combustion efficiency vs melt temperature and excess air

Промышленные горелки обычно работают с избытком воздуха 15%, чтобы минимизировать риск возможных недоокисленных газов. Таким образом, регулирование подачи воздуха обеспечивает полноту процессов сгорания топлива и удерживает температуру печи на заданном уровне [12].

4. ИЗМЕНЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В ПЕЧИ

На практике контроль продуктов сгорания обычно представляет собой соответствующие измерения CO_2 или O_2, CO и NO_x. При этом именно концентрации диоксида углерода CO_2 и O_2 определяют

эффективность сгорания вместе с температурой газов (КПД горелки) [13].

Присутствие угарного газа является показателем снижения эффективности (реакция образования моноксида является эндотермической), но его наличие предпочтительно в отношении токсичности и риска воспламеняемости. Угарный газ очень опасен, потому что его невозможно обнаружить без измерительного прибора, а последствия наличия газа и период его воздействия могут варьироваться в больших пределах.

Оксиды азота ответственны за образование паров кислот в атмосфере, которые необходимо также нейтрализовать в ходе процесса[1]. Поскольку плавка и обработка металла происходят в диапазоне высоких температур – от 1300ºС до 1500ºС, то во время плавки чернового никеля появляются различные технологические проблемы и возникают зоны перегрева как самой футеровки, так и локальный перегрев металла. Известно, что влияние может оказывать как сам природный газ, так и сера, фосфор и влага, входящие в его состав, и находящиеся в составе воздушной смеси[2] [14] NO_x и SO_2.

Контроль концентраций производили при помощи полученных данных с газоанализатора, которые обрабатывали с помощью программы STANJAN с учетом диссоциации продуктов сгорания и отходящих газов и химических реакций плавления [15].

На рис. 4 представлены изменения концентрации компонентов в зависимости

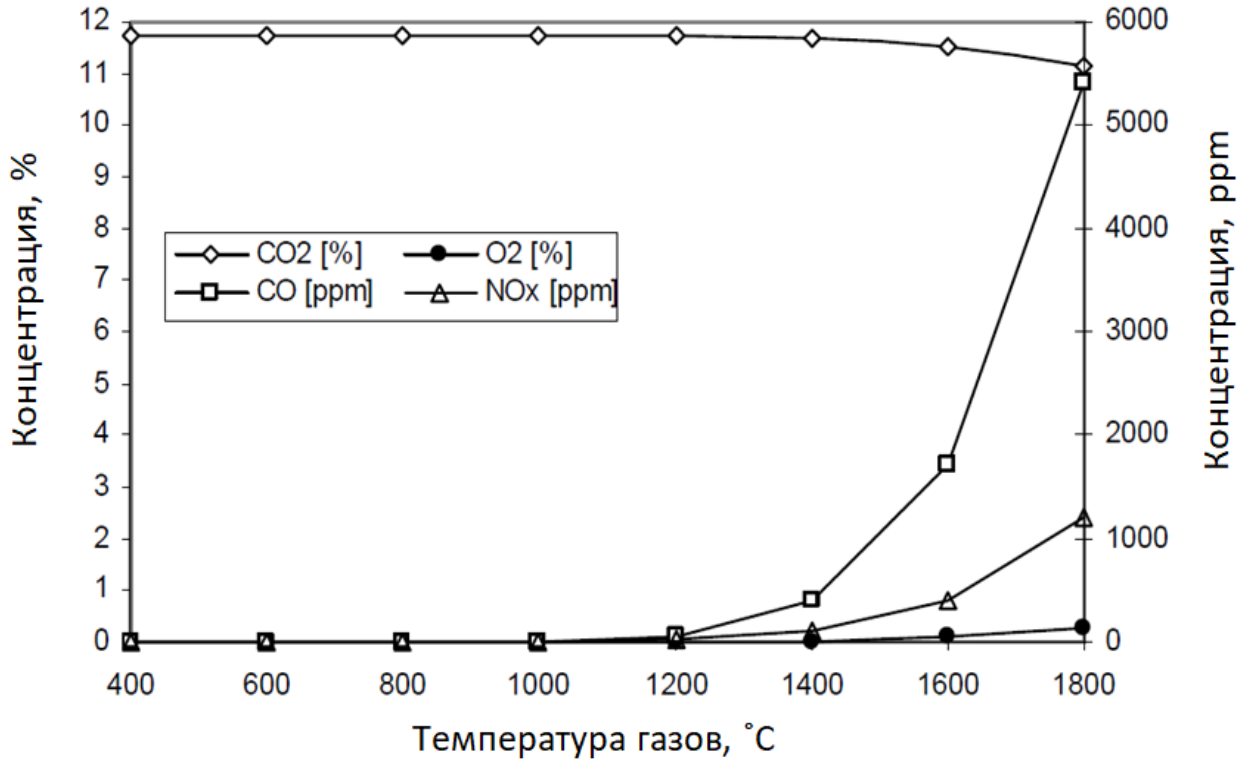


Рис. 4. Концентрация веществ в зависимости от температуры процесса, % (ppm = 10^{-4}% масс.)
Fig. 4. Concentration of substances vs process temperature,% (ppm = 10^{-4}% масс.)

[1]Диомидовский Д.А. Контроль и автоматизация процессов в цветной металлургии: учеб. пособ. М.: Металлургиздат, 1967. Т. 2. 403 с.
[2]Гальнбек А.А., Шалыгин Л.М., Шмонин Ю.Б. Расчеты пирометаллургических процессов и аппаратуры цветной металлургии: учеб. пособ. Челябинск: Металлургия, 1990. 447 с.

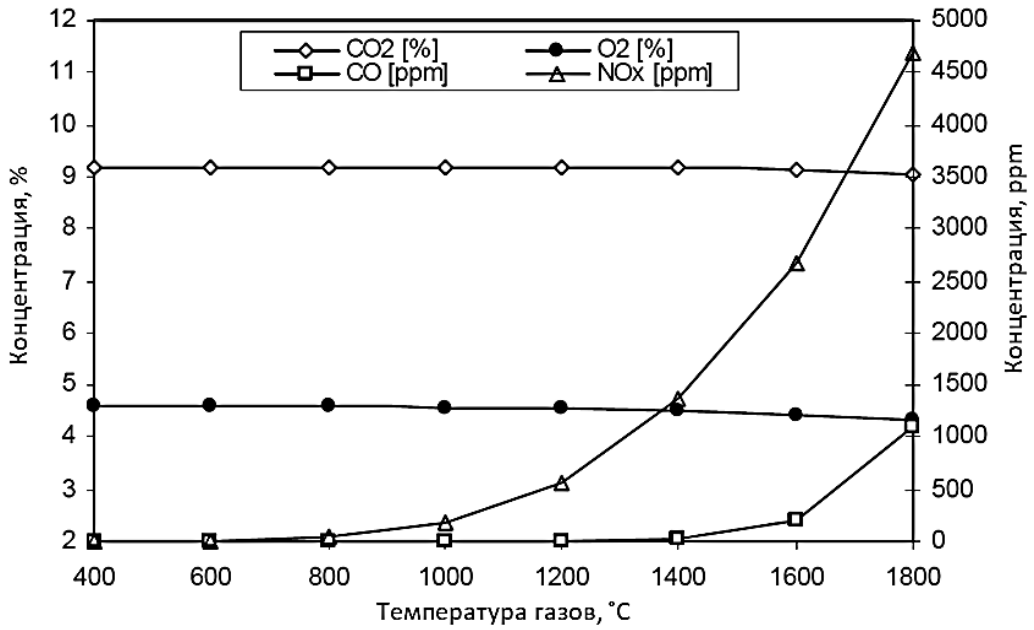


Рис. 5. Концентрация в зависимости от температуры продукта для превышения 25%
Fig. 5. Concentration vs product temperature to exceed 25%

от избытка воздуха. Как правило, уровень CO_2 находится в пределах 10–12% и начинает снижаться от температуры 1200°C с образованием CO (как следствие эффектов явления диссоциации). Такая концентрация и распределение в газах при высоких температурах создают серьезную проблему для окружающей среды, поскольку уровень CO по предельно-допустимой концентрации должен поддерживаться на уровне 0,0004 мг/м^3 в соответствии с установленными Агентством по охране окружающей среды и Американской газовой ассоциацией нормативами [16].

Следует отметить, что результаты обработки данных газоанализатора получены с учетом присутствия воды в виде пара, который является частью газов. Поэтому корректировку производили, учитывая предварительную осушку природного газа и смеси [17–20]. Снижение уровня CO достигается за счет увеличения оксидов азота по отношению к избытку воздуха. Концентрация кислорода находится на уровне 2–4%, которая может немного снижаться при повышении температуры и образовании NO_x.

Чрезмерный избыток воздуха, как показано на рис. 5, приводит к значительному снижению термического КПД процесса в результате поглощения энергии. Таким образом, тенденция изменения концентрации (в зависимости от избытка воздуха) связана с увеличением содержания NO_x.

Полученные зависимости являются полезными регулирующими инструментами при проведении диагностики атмосферы печи на примере сгорания метана. Зная значения температур газов и процентное содержание O_2, CO_2 или CO, можно управлять потоком воздуха в горелке (давлением), определить и спрогнозировать состав отходящих газов после реакций газообмена смеси природного и промышленных газов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ влияния условий подачи природного газа различного состава через горелки среднего давления марок ГГСБ-1,4 и ГГСБ-2,2 в ОП при получении чернового никеля позволил определить условия управления тепловым балансом при контроле состава отходящих газов.

При помощи прикладного программного продукта STANJAN определена взаимосвязь между различными переменными работы горелок при использовании природного газа. Отрицательное влияние из-

бытка воздуха на максимальную температуру продуктов, положительный эффект предварительного нагрева воздуха при этой температуре были определены.

Более высокая температура продуктов непосредственно на выходе из горелок марок ГГСБ-1,4 и ГГСБ-2,2 будет свидетельствовать о большей эффективности использования этого оборудования.

Избыток воздуха и температура продуктов в тепловом процессе, основанном на сжигании природного газа, являются наиболее определяющими факторами в экологических и энергетических аспектах процесса.

Прогноз сгорания метана, основного компонента природного газа, позволяет провести последующие испытания в экспериментах с целью разработки стратегий в промышленных горелках, которые способствуют максимальному использованию энергии и минимизируют образование загрязняющих веществ.

Библиографический список

1. Mehta N.C., Shukla D.D. Comparison of Life Cycle for Various Refractory Materials of Induction Melting Furnace Wall under Thermal Fatigue Loading Conditions // International Journal of Advance Engineering and Research Development. 2018. Vol. 5. Issue 1. P. 492–504. https://doi.org/10.21090/IJAERD.12853
2. Arkhazloo N.B, Bouissa Y., Bazdidi T.F., Jadidi M., Morin J.B., Jahazi M. Experimental and unsteady CFD analyses of the heating process of large size forgings in a gas-fired furnace // Case Studies in Thermal Engineering. 2019. Vol. 14. P. 100428 https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100428
3. Gondaliya V., Pujara M., Mehta N.C. Transient Heat Transfer Analysis of Induction Furnace by Using Finite Element Analysis // Indian Journal of Applied Research. 2013. Vol. 3. Issue 8. P. 231–234. https://doi.org/10.15373/2249555X/AUG2013/75
4. Hyun Sik Park, Min Chul Ha, Min Seok Kim, Jung Ho Heo, Joo Hyun Park. Novel design of ferro-nickel smelting slag by utilizing red mud as a fluxing agent: Thermochemical computations and experimental confirmation // Calphad. 2017. Vol. 56. Issue 1. P. 185–195. https://doi.org/10.1016/j.calphad.2017.01.006
5. Reynolds W.C. The element–potencial method for chemical equilibrium analysis: Implementation in the interative program STANJAN // Department of Mechanical Engineering, Stanford University. 1986. Vol. 3. [Электронный ресурс]. URL: https://shepherd.caltech.edu/EDL/PublicResources/sdt/refs/STANJAN_1986_Reynolds.pdf (28.09.2019).
6. Fernández-Tarrazo E., Sánchez-Sanz M., Sánchez A.L., Williams F.A. A multipurpose reduced chemical-kinetic mechanism for methanol combustion // Combustion Theory and Modelling. 2016. Vol. 20. Issue 4. P. 613–631.
https://doi.org/10.1080/13647830.2016.1162330
7. Fetisov V.G., Nikolaev A.K., Lykov Y.V. Aggregative simulation method for implementing mathematical models for gas transmission systems // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series (Tomsk, 04–06 December's 2017). Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. Vol. 327. P. 022033. https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022033
8. Bozzano G., Manenti F. Efficient methanol synthesis: Perspectives, technologies and optimization strategies // Progress in Energy and Combustion Science. 2016. Vol. 56. P. 71–105. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.06.001
9. Xuezhi Liu, Mancarella P. Modelling, assessment and Sankey diagrams of integrated electricity-heat-gas networks in multi-vector district energy systems // Applied Energy. 2016. Vol. 167. P. 336–352. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.089
10. Thakur G.K., Kurrey K.I., Bhushan A., Kashyap S. Analysis of Fuel injection in Blast Furnaces with the Help of CFD Software Approach // International journal of scientific and research publication. 2013. Vol. 3. Issue 3. P. 1–7.
11. Диомидовский Д.А. Металлургические печи цветной металлургии. М.: Металлургиздат, 1961. 728 с.
12. Шалыгин Л.М., Коновалов Г.В. Теплогенерация и теплоперенос в автогенных металлургических аппаратах разного типа // Цветные металлы. 2003. № 10. С. 17–24.
13. Bains P., Psarras P.C., Wilcox J. CO_2 capture from the industry sector // Progress in Energy and Combustion Science. 2017. Vol. 63. P. 146–172.
14. Гальнбек А.А. Непрерывное конвертирование штейнов. М.: Металлургия, 1993. 85 с.
15. Turns S.R. An introduction to Combustion: Concepts and Applications. New York: McGraw-Hill, 2011. 752 p.
16. Veshkini A., Dworkin S.B. A computational study of soot formation and flame structure of coflow laminar methane/air diffusion flames under microgravity and normal gravity // Combustion Theory and Modelling. 2017. Vol. 21. Issue 5. P. 864–878. https://doi.org/10.1080/13647830.2017.1308558
17. Bernhardt W. Combustion technology for the improvement of engine efficiency and emission characteristics // International Symposium on Combustion. 1977. Vol. 16. Issue 1. P. 223–232. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80327-5
18. Peng Liu, Baokuan Li, Cheung Sherman C.P., Wenyuan Wu. Material and energy flows in rotary kiln-

electric furnace smelting of ferro-nickel alloy with energy saving // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 109. Part A. P. 542–559. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.095
19. Diaz C.M., Landolt C.A., Vahed A., Warner A.E.M., Taylor J.C. A Review of Nickel Pyrometallurgical Operations // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. 2012. Vol. 40. Issue 9. P. 39–44. https://doi.org/10.1007/BF03258548
20. Гальнбек А.А. Непрерывный совмещенный процесс плавки и конвертирования высокосернистого медноникелевого сырья // Цветные металлы. 1976. № 4. С. 16–17.

References

1. Mehta NC, Shukla DD. Comparison of Life Cycle for Various Refractory Materials of Induction Melting Furnace Wall under Thermal Fatigue Loading Conditions. International Journal of Advance Engineering and Research Development. 2018;5(1):492–504. https://doi.org/10.21090/IJAERD.12853
2. Arkhazloo NB, Bouissa Y, Bazdidi TF, Jadidi M, Morin JB, Jahazi M. Experimental and unsteady CFD analyses of the heating process of large size forgings in a gas-fired furnace. Case Studies in Thermal Engineering. 2019;14:100428 https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100428
3. Gondaliya V, Pujara M, Mehta NC. Transient Heat Transfer Analysis of Induction Furnace by Using Finite Element Analysis. Indian Journal of Applied Research. 2013;3(8):231–234.
https://doi.org/10.15373/2249555X/AUG2013/75
4. Hyun Sik Park, Min Chul Ha, Min Seok Kim, Jung Ho Heo, Joo Hyun Park. Novel design of ferro-nickel smelting slag by utilizing red mud as a fluxing agent: Thermochemical computations and experimental confirmation. Calphad. 2017;56(1):185–195. https://doi.org/10.1016/j.calphad.2017.01.006
5. Reynolds WC. The element–potencial method for chemical equilibrium analysis: Implementation in the interative program STANJAN. Department of Mechanical Engineering, Stanford University. Available from:
https://shepherd.caltech.edu/EDL/PublicResources/sdt/refs/STANJAN_1986_Reynolds.pdf [Accessed 28th September 2019].
6. Fernández-Tarrazo E, Sánchez-Sanz M, Sánchez AL, Williams FA. A multipurpose reduced chemical-kinetic mechanism for methanol combustion. Combustion Theory and Modelling. 2016;20(4):613–631. https://doi.org/10.1080/13647830.2016.1162330
7. Fetisov VG, Nikolaev AK, Lykov YV. Aggregative simulation method for implementing mathematical models for gas transmission systems. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 04–06 December's 2017, Tomsk. Tomsk: Institute of Physics Publishing; 2018;327:022033. https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022033
8. Bozzano G, Manenti F. Efficient methanol synthesis: Perspectives, technologies and optimization strategies // Progress in Energy and Combustion Science. 2016;56:71–105. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.06.001
9. Xuezhi Liu, Mancarella P. Modelling, assessment and Sankey diagrams of integrated electricity-heat-gas networks in multi-vector district energy systems. Applied Energy. 2016;167:336–352. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.089
10. Thakur GK, Kurrey KI, Bhushan A, Kashyap S. Analysis of Fuel injection in Blast Furnaces with the Help of CFD Software Approach. International Journal of scientific and research publication. 2013;3(3):1–7.
11. Diomidovsky DA. *Metallurgical furnaces for non-ferrous metallurgy*. Moscow: Metallurgizdat; 1961, 728 p. (In Russ.)
12. Shalygin LM, Konovalov GV. Heat generation and heat transfer in autogenous metallurgical apparatuses of various types. *Tsvetnye metally* = Non-Ferrous Metals. 2003;10:17–24. (In Russ.)
13. Bains P, Psarras PC, Wilcox J. CO_2 capture from the industry sector. Progress in Energy and Combustion Science. 2017;63:146–172.
14. Galnbek AA. *Continuous converting of mattes*. Moscow: Metallurgiya; 1993, 85 p. (In Russ.)
15. Turns SR. *An introduction to Combustion: Concepts and Applications*. New York: McGraw-Hill; 2011, 752 p.
16. Veshkini A, Dworkin SB. A computational study of soot formation and flame structure of coflow laminar methane/air diffusion flames under microgravity and normal gravity. Combustion Theory and Modelling. 2017;21(5):864–878.
https://doi.org/10.1080/13647830.2017.1308558
17. Bernhardt W. Combustion technology for the improvement of engine efficiency and emission characteristics. International Symposium on Combustion. 1977;16(1):223–232. https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80327-5
18. Peng Liu, Baokuan Li, Cheung Sherman CP, Wenyuan Wu. Material and energy flows in rotary kiln-electric furnace smelting of ferro-nickel alloy with energy saving. Applied Thermal Engineering. 2016;109(A):542–559.
https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.095
19. Diaz CM, Landolt CA, Vahed A, Warner AEM, Taylor JC. A Review of Nickel Pyrometallurgical Operations. The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society. 2012;40(9):39–44. https://doi.org/10.1007/BF03258548
20. Galnbek AA. Continuous combined smelting and converting of high-sulfur copper-nickel raw materials. *Tsvetnye metally* = Non-Ferrous Metals. 1976;4:16–17. (In Russ.)

Критерии авторства

Кирос Кабасканго В.Э., Бажин В.Ю. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Authorship criteria

Quiroz Cabascango V.E., Bazhin V.Yu. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кирос Кабасканго Валерия Эстефания,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия;
✉e-mail: valeritae111@mail.ru

Бажин Владимир Юрьевич,
профессор, доктор технических наук,
заведующий кафедрой автоматизации
технологических процессов и производств,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия;
e-mail: bazhin-alfoil@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valeria Esthefanía Quiroz Cabascango,
Postgraduate Student,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
✉e-mail: valeritae111@mail.ru

Vladimir Yu. Bazhin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Automation
of Technological Processes and Production,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
e-mail: bazhin-alfoil@mail.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 541.669.046
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-231-240

Влияние красного шлама на предотвращение полиморфизма двухкальциевого силиката и саморазрушение агломерата

© А.А. Халифа, В.А. Утков, В.Н. Бричкин
Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Резюме: Целью работы является количественная оценка влияния красного шлама на стабильность β-фазы двухкальциевого силиката, основанная на ранее выявленной способности красного шлама повышать прочность агломерата. Работа направлена на решение проблемы уменьшения количества складируемых отходов красного шлама, образующихся при получении глинозема из бокситов. Накопители красного шлама занимают большие площади, наносят вред окружающей среде и являются источником чрезвычайных ситуаций, которые возникают с известной периодичностью. Перспективная сфера утилизации красного шлама связана с его использованием в металлургии черных металлов в качестве протектора самопроизвольного разрушения доменных агломератов. При этом эквивалентно снижению количества мелочи в шихте (частиц фракции 0–5 мм) повышается производительность доменных печей и уменьшается расход кокса. Самопроизвольное разрушение офлюсованного железорудного агломерата объясняется возникновением внутренних напряжений, причиной которых является увеличение на 10% объема кристаллической решетки двухкальциевого силиката – $2CaO{\cdot}SiO_2$ (Ca_2SiO_4) и химическая неустойчивость свободной извести в составе агломерата. При охлаждении до 675°С двухкальциевый силикат претерпевает полиморфное превращение, связанное с изменением кристаллической структуры при переходе из β- в γ-модификацию и увеличением ее объема. Зерна CaO взаимодействуют с влагой, содержащейся в воздухе, превращаясь в $Ca(OH)_2$. Процесс агломерации воспрозводили на примере шихты заданного состава с ее спеканием при температуре 1200–1250°С. Устойчивость к саморазрушению брикетированной шихты после ее термообработки определялась по содержанию образующейся мелочи (частиц крупностью 0–5 мм) после охлаждения агломерата. В качестве материала для исследований использовались красные шламы – техногенное сырье производства глинозема одного из отечественных заводов. Результаты исследований показали, что при содержании не менее 3–5% масс. красного шлама в шихте с отношением CaO/SiO_2 = 2 обеспечивается устойчивость к саморазрушению образующихся продуктов спекания. Все образцы спеков, полученные с добавлением красного шлама в количестве 3–5% масс., обладают способностью препятствовать полиморфизму двухкальциевого силиката и, следовательно, предотвращать саморазрушение окускованного материала. Установлено, что данный эффект усиливается при увеличении содержания в красном шламе Al_2O_3 и $Na_2O(K_2O)$.

Ключевые слова: красный шлам, техногенное сырье, двухкальциевый силикат, офлюсованный агломерат, полиморфизм

Благодарности: Работа проведена при финансовой поддержке Российского научного фонда по Соглашению № 18-19-00577 от 26.04.2018 о предоставлении гранта на проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований.

Информация о статье: Дата поступления 18 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 24 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Халифа А.А., Утков В.А., Бричкин В.Н. Влияние красного шлама на предотвращение полиморфизма двухкальциевого силиката и саморазрушение агломерата. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 1. С. 231–240. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-231-240

Red mud effect on dicalcium silicate polymorphism and sinter self-destruction prevention

Ahmed A. Khalifa, Vladimir A. Utkov , Vyacheslav N. Brichkin
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to provide a quantitative estimate of the red mud effect on bicalcium silicate β-phase stability based on the previously identified ability of the red mud to increase sinter strength. The work is aimed at solving the problem of reduction of the amount of stored red mud waste resulting from the production of alumina from

bauxites. Red mud accumulators occupy large areas, damage the environment and cause periodical emergencies. A promising field of red mud utilization is associated with its use in ferrous metallurgy as a protector of spontaneous destruction of blast furnace sinter. In this case, the productivity of blast furnaces grows and coke consumption drops in equivalent to the reduction of the amount of fines in the charge (particles of 0–5 mm fraction). Spontaneous destruction of the flux iron ore sinter is explained by the occurrence of internal stresses, which are caused by the 10% increase in the volume of the crystal lattice of bicalcium silicate $2CaO{\cdot}SiO_2$ (Ca_2SiO_4) and chemical instability of free lime as a sinter component. When cooled up to 675°C, bicalcium silicate undergoes a polymorphic transformation associated with the change in the crystal structure during the transition from β - to γ-modification and its volume increase. CaO grains interact with the moisture contained in the air and transform into $Ca(OH)_2$. The agglomeration process has been reproduced on example of the charge of given composition and its sintering at the temperature of 1200–1250°C. Self-destruction resistance of the briquetted charge after its heat treatment is determined by the content of the resulting fines (particles of 0–5 mm) after sinter cooling. Red muds as technogenic raw materials for alumina production at one of the domestic plants serve as a material for investigation. Research results have shown that the content of red mud of at least 3–5% wt in the charge with the ratio of $CaO/SiO_2 = 2$ provides the resistance of the resulting sintering products to self-destruction. All cake samples obtained with the addition of red mud in the amount of 3–5% wt. have the ability to prevent bicalcium silicate polymorphism and, therefore, prevent self-destruction of the agglomerated material. It is found that this effect is enhanced if the content of Al_2O_3 and $Na_2O(K_2O)$ in red mud increases.

Keywords: red mud, technogenic raw material, dicalcium silicate, flux sinter, polymorphism

Acknowledgements: The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation under the Agreement No. 18-19-00577 of April 26 2018 of grant for the fundamental scientific research and exploratory scientific research.

Information about the article*:* Received November 18, 2019; accepted for publication December 24, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Khalifa AA, Utkov VA, Brichkin VN. Red mud effect on dicalcium silicate polymorphism and sinter self-destruction prevention. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):231–240. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-231-240

1. ВВЕДЕНИЕ

Металлургическая промышленность сопровождается образованием значительного количества техногенных отходов, хранение которых на шламовых полях и полигонах приводит к загрязнению окружающей среды [1, 2]. Полное использование промышленных отходов металлургических производств вместо их складирования в настоящее время является одной из главных природоохранных задач, решение которой нуждается в разработке и применении эффективных технологических решений. В данной работе предлагается использование складируемых отходов красного шлама (КШ), образующихся при получении глинозема из бокситов, в черной металлургии. Накопители красного шлама занимают большие площади, наносят вред окружающей среде и являются источником чрезвычайных ситуаций, которые возникают с известной периодичностью. В мире КШ стали повсеместно известными после крупнейшей техногенной катастрофы, произошедшей в 2010 г. в Венгрии. В результате разрушения ограждающей дамбы наливного хранилища, миллионы тонн КШ разлились на тысячи гектаров земли, уничтожая природную среду, сельскохозяйственную инфраструктуру и загрязняя важнейшую в Европе реку Дунай. На длительное время были ограничены средства обеспечения жизнедеятельности населения и промышленного производства в районе катастрофы [3–7]. Риски повторения аналогичной катастрофы возрастают в условиях участившихся природных катаклизмов (ливневые дожди, наводнения, смерчи, ураганы, землетрясения), а также роста террористических угроз.

В мире ежегодно складируют более 120 млн т красных шламов, а в России – более 1,5 млн т. Для решения проблемы утилизации КШ предложено множество технологий их переработки с извлечением ценных элементов (железа, алюминия, титана, ванадия, редкоземельных металлов и др.). Также разработаны процессы их утилизации с целью дальнейшего использования в производстве строительных материалов, керамики, катализаторов и сорбен-

тов, применяемых для очистки от вредных веществ отходящих газов и жидкостей [8–11]. Известны предложения по использованию КШ в качестве протектора самопроизвольного разрушения доменных агломератов в производстве чугуна, табл. 1 [12–14]. При этом происходит упрочнение агломерата, а эквивалентно снижению количества мелочи в шихте (частиц фракции 0–5 мм) повышается производительность доменных печей и уменьшается расход кокса [15–17].

Самопроизвольное разрушение офлюсованного агломерата объясняется возникновением в спеке внутренних напряжений, причиной которых является увеличение на 10% объема кристаллической решетки при полиморфизме находящегося в агломерате двухкальциевого силиката – Ca_2SiO_4 (C_2S). Дополнительное увеличение объема связано с гидратацией свободной (непрореагировавшей) извести (CaO) при последующем контакте агломерата с влагой, содержащейся в воздухе. Природу первого явления подтверждает экстремальная зависимость прочности агломерата от его основности ($vCaO/vSiO_2$) с минимальным показателем прочности при основности на уровне 1,2–1,35, где стекловидная оливиновая связка по составу приближается к C_2S.

На рис. 1 приведена диаграмма состояния однокомпонентной системы $2CaO{\cdot}SiO_2$, предложенная Х. Бредигом, в соответствии с которой C_2S существует в четырех полиморфных модификациях: α-, α'-, β- и γ-C_2S[2]. Три из них энантиотропные, т.е. имеют температурные области стабильного существования. К ним относятся

Таблица 1

Показатели саморазрушения промышленных доменных агломератов (по Е.Ф. Вегману)[1]

Table 1

Indicators of industrial blast furnace cake self-destruction (by E.F. Wegman)[1]

Агломерационная фабрика	Основность агломерата (CaO/SiO_2)	Прочность барабанной пробы, %			Содержание мелочи (<5 мм) в агломерате	
		по ГОСТ 5953-81		по Рубину <5 мм	на агло-фабрике	в доменном цехе
		>5 мм	<0,5 мм			
ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (г. Магнитогорск)	1,40	70,00	5,60	26,0	8,40	15,40
АО «Уральская сталь» (г. Новотроицк)	1, 56	65,50	4,50	–	10,50	23,70
ПАО «Челябинский металлургический комбинат» (г. Челябинск)	0,88	–	–	27,90	12,50	22,10
ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (г. Липецк)	1,56	65,50	4,50	–	8,10	14,30
ОАО «Тулачермет» (г. Тула)	1,29	69,89	5,70	–	9,50	18,60
ОАО «Северсталь» (г. Череповец)	1,30	62,40	7,40	21,90	12,10	20,30

[1]Вегман Е.Ф., Жеребин Н.Ф., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С., Курунов И.Ф., Пареньков А.Е. [и др.] Металлургия чугуна: учебник для вузов. М.: Академкнига, 2004. 774 с.

устойчивая при температуре до 850°C γ-C_2S модификация α'-C_2S, стабильная в диапазоне от 850 до 1450°C и высокотемпературная фаза α-C_2S, устойчивая в интервале 1450–2130°C. Модификация β-C_2S при обычном давлении не имеет температурной области стабильного существования, т.е. является метастабильной ниже 675°C и монотропной по отношению к модификации γ-C_2S. Характер полиморфных превращений в чистых образцах $2CaO \cdot SiO_2$ можно представить схемой, приведенной на рис. 1[2]. Таким образом, модификация α'-C_2S при охлаждении сначала переходит в метастабильную форму β-C_2S, а последняя – в термодинамически устойчивую при низкой температуре и атмосферном давлении фазу γ-C_2S [18, 19]. Известно значительное количество стабилизаторов C_2S, недостатком которых является их высокая стоимость [10, 20, 21], что делает обоснованным решение задачи количественной оценки влияния красного шлама на стабильность модификации β-двухкальциевого силиката.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

При выполнении экспериментальных исследований использовали красный шлам глиноземного производства, представляющий собой твердый остаток с крупностью частиц менее 0,063 мм, после выщелачивания боксита с извлечением основного количества оксида алюминия в щелочной алюминатный раствор. Из процесса он выводится в виде пульпы с отношением жидкого к твердому (Ж:Т) преимущественно от 3 до 5. Отобранные образцы промытого красного шлама высушивали, а образующиеся при этом твердые комки размалывали до порошкообразного состояния. Пробы КШ имели химический состав, приведенный в табл. 2.

Экспериментальное моделирование процесса агломерации выполнялось путем спекания брикетированной шихты заданного состава в муфельной лабораторной печи Nabertherm (Германия) при температуре 1200–1250°C, соответствующей получению офлюсованных железорудных агломератов в промышленных условиях. Исходными материалами служили химически чистые реагенты и реактивы за исключением проб красного шлама, вещественный состав которого приведен на рис. 2 по результатам рентгенофазового анализа. Для ускорения и снижения температуры процесса синтеза контрольного образца C_2S в состав шихты вводили оксид железа, естественно присутствующий при спекании железорудных агломератов в качестве одного из основных компонентов. Состав брикетов с добавлением КШ приведен в табл. 3. Их получали после увлажнения шихты до 5–8 % и ее продолжительного перемешивания в барабанном смесителе. Прессование шихты выполнялось под давлением 20 МПа с получением брикетов диаметром и высотой 10 мм. В табл. 3 приведены усредненные данные о химическом составе полученных брикетированных шихт.

После спекания брикеты охлаждались на воздухе до комнатной температуры для естественного перехода β-C_2S в γ-C_2S. Стабильность спеков определялась по их внешнему виду и по содержанию образовавшейся фракции 0–0,5 мм в тигле, в который помещался брикет.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты эксперимента приведены на рис. 4 и 5. При добавлении красного шлама в шихту в количестве до 3,0% стабилизация двухкальциевого силиката не наблюдается. Данные рентгенофазового анализа (рис. 4) свидетельствуют о том, что после охлаждения спека, полученного без добавки красного шлама, его основными кристаллическими фазами являются β-C_2S (ларнит) в количестве около 80%, γC_2S (оливин) с содержанием 14,7% и свободная известь CaO в количестве 0,2%.

[2]Абрамов В.А., Николаев И.В., Стельмакова Г.Д. Физико-химические основы комплексной переработки алюминиевого сырья (щелочные способы): учеб. пособ. М.: Металлургия, 1985. 288 с.

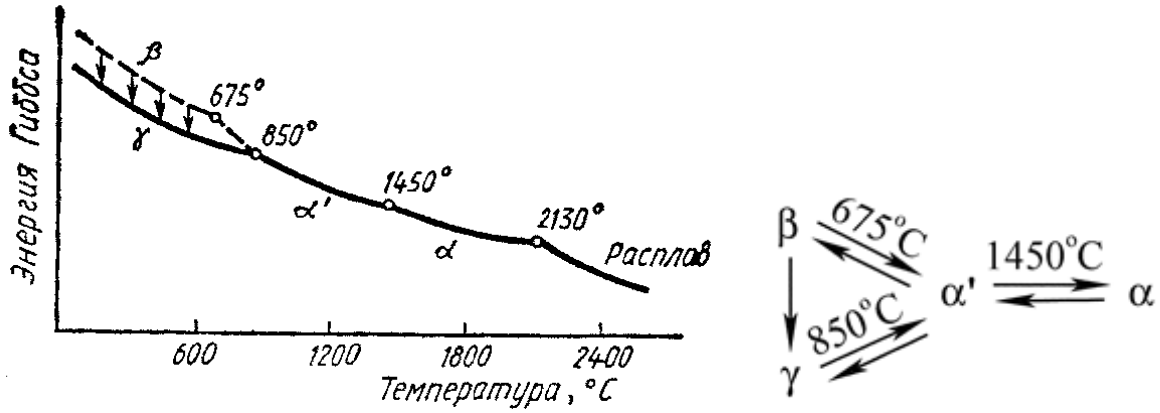


Рис. 1. Схема полиморфизма $2CaO \cdot SiO_2$
Fig. 1. Diagram of $2CaO \cdot SiO_2$ polymorphism

Таблица 2

Химический состав проб красного шлама

Table 2

Chemical composition of red mud samples

№ пробы КШ	Химический состав, % масс.					
	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	SiO_2	TiO_2	$\Sigma(Na_2O+K_2O)$ в пересчете на Na_2O
1	52,7	14,9	9,8	8,9	5,8	5,6
2	49,6	12,6	9,4	5,1	5,1	5,9
3	56,3	11,6	8,4	6,5	5,9	3,3
4	55,4	11,4	9,7	7,4	5,9	0,9

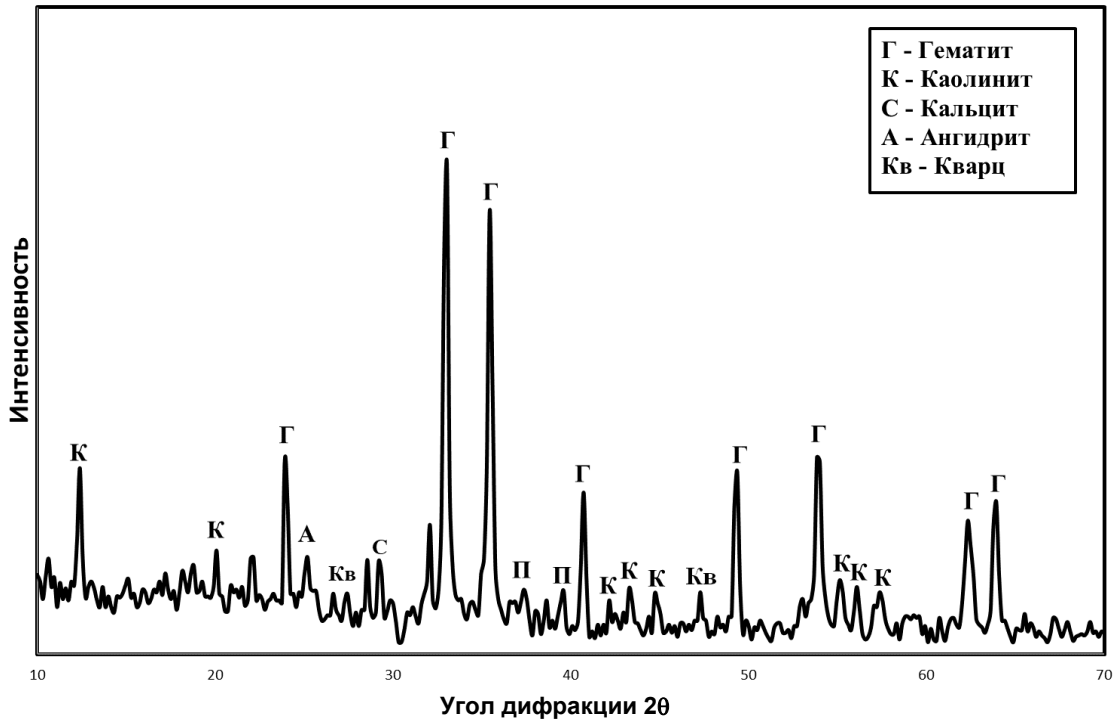


Рис. 2. Рентгенограмма красного шлама
Fig. 2. Red mud X-ray

Таблица 1

Химический состав брикетов с различным количеством красного шлама

Table 3

Chemical composition of briquettes with different amounts of red mud

№ пробы	Содержание в брикете, % масс.		
	$CaCO_3$	SiO_2	КШ
1	76,90	23,10	0
2	76,13	22,87	1,0
3	75,31	22,69	2,0
4	74,65	22,35	3,0
5	73,85	22,15	4,0
6	73,10	21,90	5,0

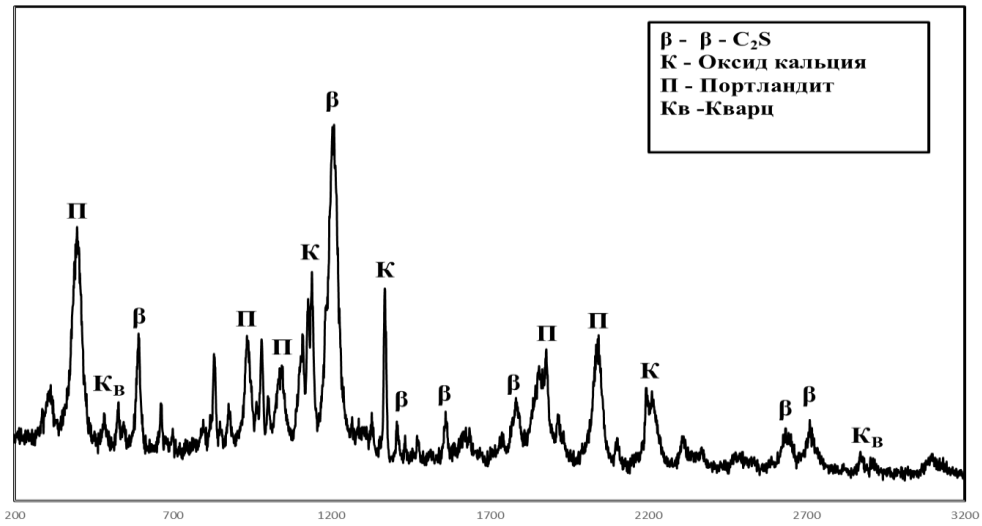


Рис. 4. Рентгенограмма фазового состава спеченного брикета без добавки красного шлама
Fig. 4. X-ray of the phase composition of sintered briquette free from red mud additive



a ***b*** ***c*** ***d*** ***e*** ***f***

Рис. 5. Брикеты после выдержки (спекания) при температуре 1250°С с различным содержанием красного шлама в шихте, % масс.:
a – без добавки; b – 1; c – 2; d – 3; e – 4; f – 5
Fig. 5. Briquettes after sintering at temperature 1250°C with various contents of red mud in the charge, % wt
a – no additive; b – 1; c – 2; d – 3; e – 4; f – 5

Добавление к C2S красного шлама в количестве 3,0–5,0% (см. рис. 5 d, e, f) позволяет получать преимущественно β-C_2S. Таким образом, предотвращается самораз-рушение спека. Количество образовавшей-ся фракции 0–0,5 мм после охлаждения спека близко к нулю (рис. 6). Увеличение содержания в красном шламе оксидов алюминия и натрия повышает стабиль-ность спека. Это может быть объяснено образованием твердых растворов, изменя-ющих диаграмму состояния $2CaO \cdot SiO_2$ (рис. 7).

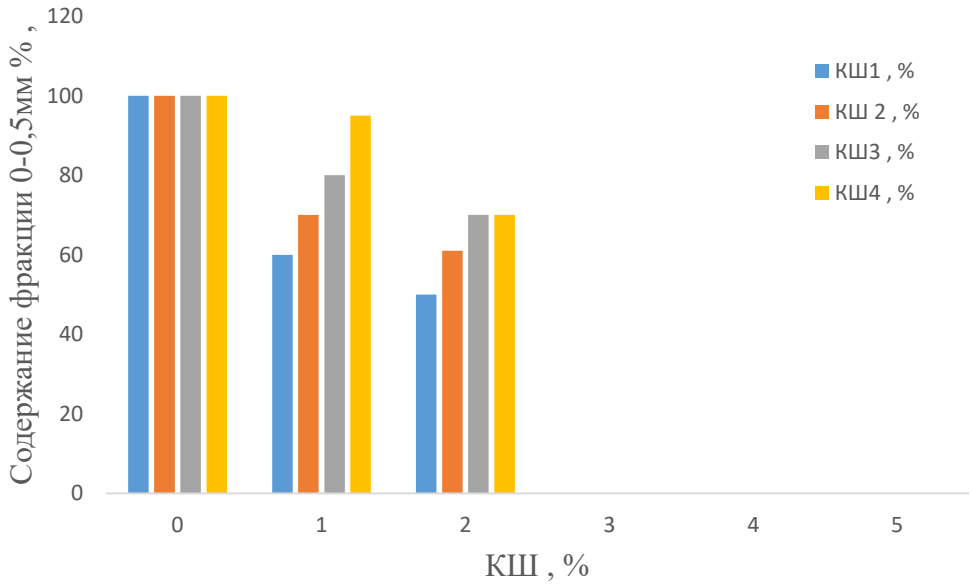


Рис. 6. Стабильность спека, содержащего красный шлам различного состава (см. табл. 2), по образованию мелкой фракции (0–0,5 мм)
Fig. 6. Stability of the cake containing different composition of red mud (see table 2) in fine fraction formation (0–0.5 mm)

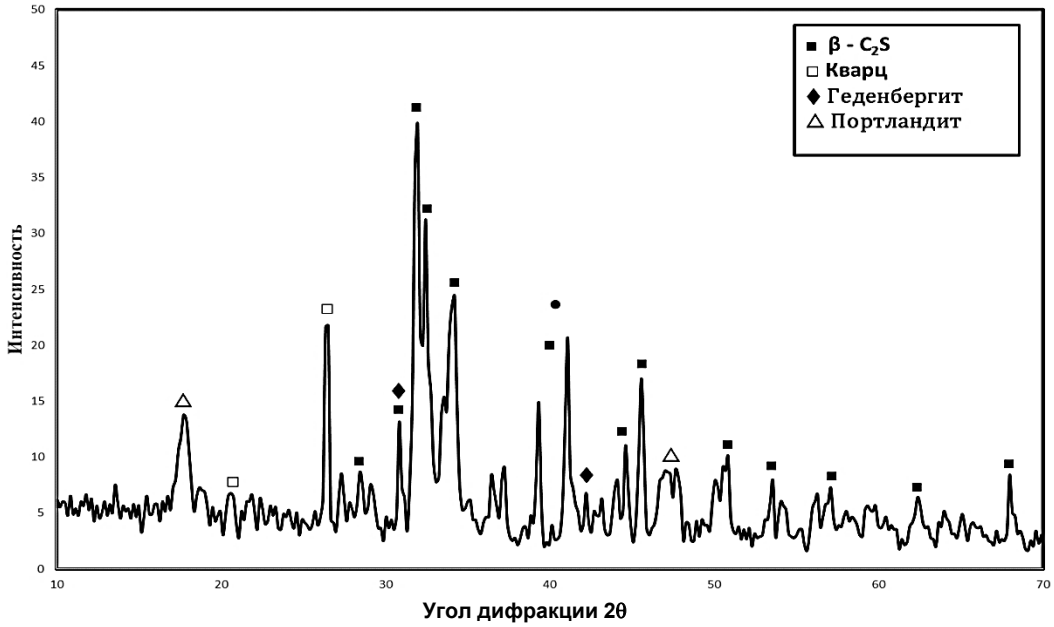


Рис. 7. Рентгенограмма фазового состава спеченного брикета с 5% содержанием красного шлама в шихте
Fig. 7. X-ray of the phase composition of the sintered briquette with 5% content of red mud

При сравнении данных рис. 4 и 7 видно, что введение в шихту красного шлама вызывает сокращение в спеке количества не усвоившейся извести, что положительно влияет на процесс минералообразования агломерата и его стабильность при хранении.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально установлено, что введение красного шлама в количестве не менее 3–5% масс. в состав шихты для синтеза двухкальциевого силиката обеспечивает получение неразрушающегося спе-

ка (офлюсованного агломерата) за счет стабилизации β-фазы C_2S, образующейся при спекании, и более полного усвоения оксида кальция.

2. На примере образцов красного шлама различного химического состава показана положительная роль содержания в нем оксидов алюминия и натрия (калия), повышающих стабилизирующую способность красного шлама, что может объясняться образованием устойчивых твердых растворов с их участием в системе $CaO\text{-}SiO_2$.

Библиографический список

1. Grenerczy G., Wegmüller U. Persistent scatterer interferometry analysis of the embankment failure of a red mud reservoir using ENVISAT ASAR data // Natural Hazards. 2011. Vol. 59. P. 1047–1053. https://doi.org/10.1007/s11069-011-9816-6
2. Беседин А.А., Утков В.А., Бричкин В.Н., Сизяков В.М. Агломерационное спекание красных шламов // Обогащение руд. 2014. № 2. С. 28–31.
3. Братыгин Е.В., Газалеева Г.И., Дмитриева Е.Г., Калугин Я.И. Использование обогащенных красных шламов при производстве высокоофлюсованных агломератов с целью дальнейшей их переработки в доменных печах // Металлургия – ИНТЕХЭКО-2012: сб. докл. V Междунар. конф. (г. Москва, 27–28 марта 2012 г.). М., 2012. С. 63–67.
4 Mymrin V., Alekseev K., Fortini O.M., Aibuldinov Y.K., Pedroso C.L., Nagalli A. et al. Environmentally clean materials from hazardous red mud, ground cooled ferrous slag and lime production waste // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 161. P. 376–381. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.109
5 Ruyters S., Mertens J., Vassilieva E., Dehandschutter B., Poffijn A., Smolders E. The Red Mud Accident in Ajka (Hungary): Plant Toxicity and Trace Metal Bioavailability in Red Mud Contaminated Soil // Environmental Science and Technology. 2011. Vol. 45. Issue 4. P. 1616–1622. https://doi.org/10.1021/ es104000m
6. Liu Zhaobo, Li Hongxu. Metallurgical process for valuable elements recovery from red mud – A review // Hydrometallurgy. 2015. Vol. 155. P. 29–43. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.03.018
7. Zinoveev D.V., Diubanov V.G., Shutova A.V., Ziniaeva M.V. Recycling of red muds with the extraction of metals and special additions to cement // Russian Metallurgy (Metally). 2015. Issue 1. P. 19–21. https://doi.org/10.1134/S0036029515010164
8. Трушко В.Л., Утков В.А., Бажин В.Ю. Актуальность и возможности полной переработки красных шламов глиноземного производства // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 547–553. https://doi.org/10.25515/PMI.2017.5.547
9. Klauber C., Grafe M., Power G. Bauxite residue issues: II. Options for residue utilization // Hydrometallurgy. 2011. Vol. 108. P. 11–32.
10. Утков В.А., Леонтьев Л.И. Повышение прочности агломератов и окатышей при помощи бокситового красного шлама // Сталь. 2005. Т. 9. С. 2–4.
11. Cuesta A., Aranda M.A.G., Sanz J., De La Torre Á.G., Losilla E.R. Mechanism of stabilization of dicalcium silicate solid solution with aluminium // Dalton Transactions. 2014. Vol. 43. Issue 5. P. 2176–2182. https://doi.org/10.1039/C3DT52194J
12. Mombelli D., Barella S., Gruttadauria A., Mapelli C. Iron Recovery from Bauxite Tailings Red Mud by Thermal Reduction with Blast applied sciences // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. P. 4902. https://doi.org/10.3390/app9224902
13. Kumar S., Kumar R., Bandopadhyay A. Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries // Resources, Conservation and Recycling. 2006. Vol. 48. Issue 4. P. 301–314. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.03.003
14. Shiryaeva E.V., Podgorodetskii G.S., Malysheva T.Y., Gorbunov V.B., Zavodyanyi A.V., Shapovalov A.N. Effects of Adding Low-Alkali Red Mud to the Sintering Batch at OAO Ural'skaya Stal' // Steel in Translation. 2014. Vol. 44. P. 6–10. https://doi.org/10.3103/S0967091214010173
15. Kumar R., Srivastava J.P., Premchand. Utilization of iron values of red mud formetallurgical applications // Environmental and Waste Management. Jamshedpur: National Metallurgical Laboratory, 1998. P. 108–119. https://doi.org/eprints.nmlindia.org/7364/
16. Шаповалов Н.А. Бушуева Н.П., Панова О.А. Влияние железосодержащих минералов на процесс образования двухкальциевого силиката // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. XXI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Новосибирск, 15 мая 2013 г.). Новосибирск: Изд-во СибАК, 2013. С. 146–152.
17. Podgorodetskiy G., Gorbunov V., Panov A., Petrov S. Gorbachev S. Complex Ad-ditives on the Basis of Red Mud for Intensification of Iron-Ore Sintering and Pelletizing // Light Metals. 2015. P. 107–111. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_20
18. Yamnova N.A., Zubkova N.V., Eremin N.N., Zadov A.E., Gazeev V.M. Crystal structure of larnite β-Ca2SiO4 and specific features of polymorphic transitions in dicalcium orthosilicate // Crystallography Reports. 2011. Vol. 56. P. 210–220. https://doi.org/10.1134/s1063774511020209
19. Xiong Zhihua, Liu Xi, Shieh Sean R., Wang Sicheng, Chang Linlin, Tang Junjie et al. Some thermodynamic properties of larnite (β-Ca2SiO4) constrained by high T/P experiment and/or theoretical simulation // American Mineralogist. 2016. Vol. 101. Issue 2. P. 277–288. https://doi.org/10.2138/am-2016-5425
20. Ghosh S.N., Bhaskara Rao P., Paul A.K., Raina K. The chemistry of dicalcium silicate mineral // Journal of Materials Science. 1979. Vol. 14. P. 1554–1566. https://doi.org/10.1007/BF00569274

21. Lopatin D.V., Chizhikova V.M. Crystal-chemical stabilization of dicalcium silicate // Steel in Translation. 2007. Vol. 37. P. 191–195. https://doi.org/10.3103/s0967091207030035

References

1. Grenerczy G, Wegmüller U. Persistent scatterer interferometry analysis of the embankment failure of a red mud reservoir using ENVISAT ASAR data. Natural Hazards. 2011;59:1047–1053. https://doi.org/10.1007/s11069-011-9816-6

2. Besedin AA, Utkov VA, Brichkin VN, Sizyakov VM. Red mud sintering. *Obogashchenie rud* = Ore Beneficiation 2014;2:28–31. (In Russ.)

3. Batygin EV, Gazalieva GI, Dmitriev EG, Kalugin YI. Use of concentrated red muds in highly fluxed agglomerate production for their further processing in blast furnaces. In: *Metallurgiya – INTEHEKO-2012: sbornik dokladov V Mezhdunarodnoj konferencii* = Metallurgy - INTECHECO-2012: Collected reports of V International conference. 27–28 March 2012, Moscow. Moscow; 2012, p. 63–67 (In Russ.)

4. Mymrin V, Alekseev K, Fortini OM, Aibuldinov YK, Pedroso CL, Nagalli A, et al. Environmentally clean materials from hazardous red mud, ground cooled ferrous slag and lime production waste. Journal of Cleaner Production. 2017;161:376–381. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.109

5. Ruyters S, Mertens J, Vassilieva E, Dehandschutter B, Poffijn A, Smolders E. The Red Mud Accident in Ajka (Hungary): Plant Toxicity and Trace Metal Bioavailability in Red Mud Contaminated Soil. Environmental Science and Technology. 2011;45(4):1616–1622. https://doi.org/10.1021/es104000m

6. Liu Zhaobo, Li Hongxu. Metallurgical process for valuable elements recovery from red mud – A review. Hydrometallurgy. 2015;155:29–43. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.03.018

7. Zinoveev DV, Diubanov VG, Shutova AV, Ziniaeva MV. Recycling of red muds with the extraction of metals and special additions to cement. Russian Metallurgy (Metally). 2015;1:19–21. https://doi.org/10.1134/S0036029515010164

8. Trushko VL, Utkov VA, Bazhin VY. Relevance and possibilities for complete processing of alumina production red muds. *Zapiski Gornogo instituta* = Journal of Mining Institute. 2017;227:547–553. https://doi.org/10.25515/PMI.2017.5.547 (In Russ.)

9. Klauber C, Grafe M, Power G. Bauxite residue issues: II. Options for residue utilization. Hydrometallurgy. 2011;108:11–32.

10. Utkov VA, Leontiev LI. Increasing of cake and pellet strength by bauxite red mud. *Stal'* = Steel. 2005;9:2–4. (In Russ.)

11. Cuesta A, Aranda MAG, Sanz J, De La Torre ÁG, Losilla ER. Mechanism of stabilization of dicalcium silicate solid solution with aluminium. Dalton Transactions.2014;43(5): 2176–2182. https://doi.org/10.1039/C3DT52194J

12. Mombelli D, Barella S, Gruttadauria A, Mapelli C. Iron recovery from bauxite tailings red mud by thermal reduction with blast applied sciences. Applied Science. 2019;9:4902. https://doi.org/10.3390/app9224902

13. Kumar S, Kumar R, Bandopadhyay A. Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries. Resources, Conservation and Recycling. 2006;48(4):301–314. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.03.003

14. Shiryaeva EV, Podgorodetskii GS, Malysheva TY, Gorbunov VB, Zavodyanyi AV, Shapovalov AN. Effects of Adding Low-Alkali Red Mud to the Sintering Batch at OAO Ural'skaya Stal'. Steel in Translation. 2014;44:6–10. https://doi.org/10.3103/S0967091214010173

15. Kumar R, Srivastava JP, Premchand. Utilization of iron values of red mud formetallurgical applications. In: Environmental and Waste Management. Jamshedpur: National Metallurgical Laboratory; 1998, p. 108–119. https://doi.org/eprints.nmlindia.org/7364/

16. Shapovalov NA, Bushueva NP, Панова OA. The influence of the iron-containing minerals in the process of formation of dicalcium silicate. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike: sbornik statej po materialam XXI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* = Technical sciences – from theory to practice: collected articles by the materials of XXI International scientific and practical conference. 15 May 2013, Novosibirsk. Novosibirsk: SibAK; 2013, p. 146–152. (In Russ.)

17. Podgorodetskiy G, Gorbunov V, Panov A, Petrov S. Gorbachev S. Complex ad-ditives on the basis of red mud for intensification of iron-ore sintering and pelletizing. Light Metals. 2015;107–111. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_20

18. Yamnova NA, Zubkova NV, Eremin NN, Zadov AE, Gazeev VM. Crystal structure of larnite β-Ca2SiO4 and specific features of polymorphic transitions in dicalcium orthosilicate. Crystallography Reports. 2011;56:210–220. https://doi.org/10.1134/s1063774511020209

19. Xiong Zhihua, Liu Xi, Shieh Sean R., Wang Sicheng, Chang Linlin, Tang Junjie et al. Some thermodynamic properties of larnite (β-Ca2SiO4) constrained by high T/P experiment and/or theoretical simulation. American Mineralogist. 2016;101(2):277–288.https://doi.org/10.2138/am-2016-5425

20. Ghosh SN, Bhaskara Rao P, Paul AK, Raina K. The chemistry of dicalcium silicate mineral. Journal of Materials Science. 1979;14:1554–1566. https://doi.org/10.1007/BF00569274

21. Lopatin DV, Chizhikova VM. Crystal-chemical stabilization of dicalcium silicate. Steel in Translation. 2007;37:191–195.
https://doi.org/10.3103/s0967091207030035

Критерии авторства

Халифа А.А., Утков В.А., Бричкин В.Н. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Khalifa A.A., Utkov V.A., Brichkin V.N. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Халифа Ахмед Абделазим,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,
21-я линия, 2, Россия;
✉ e-mail: engahmedkhalifa2@gmail.com

Утков Владимир Афанасьевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры автоматизации
технологических процессов и производств,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,
21-я линия, 2, Россия;
e-mail: utkovVA@yandex.ru

Бричкин Вячеслав Николаевич,
доктор технических наук,
заведующий кафедрой металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,
21-я линия, 2, Россия;
e-mail: kafmetall@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ahmed A. Khalifa,
Postgraduate Student,
Saint-Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
✉ e-mail: engahmedkhalifa2@gmail.com

Vladimir A. Utkov,
Dr. Sci. (Eng.),
Professor of the Department
of Technological Processes and Production,
Saint-Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
e-mail: utkovVA@yandex.ru

Vyacheslav N. Brichkin,
Dr. Sci. (Eng.),
Head of the Metallurgy Department,
Saint-Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
e-mail: kafmetall@mail.ru

Уважаемые коллеги!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации

I. Статья представляется **в электронном и распечатанном видах**. Рекомендуемый объем статьи не менее 10 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение.
2. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (4-5); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон и e-mail ***(вся информация предоставляется одним файлом)***.
3. Статья должна иметь личную подпись автора; на статьях адъюнктов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

II. **Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail** должны быть также представлены по электронной почте: pgp@istu.edu **в виде файла с расширением *.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

1) параметры **страницы** и абзаца: отступы сверху и снизу **– 2 см**; слева и справа – **2 см**; **табуляция – 2 см**; ориентация – книжная;
2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются ***курсивом***; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
4) **рисунки**, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word или в MS Excel**, с **приложением файлов (представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах)**;
5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

Стоимость журнала – 500 руб. (без стоимости почтовых расходов).

«Вестник ИрГТУ» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНИТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «Вестник ИрГТУ», 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 за выпуск.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: pgp@istu.edu

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Научный журнал
№ 1 (150) 2020

12+

Редактор Я.В. Макшанцева
Художественный редактор Е.В. Хохрин
Ответственный за выпуск Г.П. Привалова
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 28.02.2020 г. Формат 60x90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 31.
Тираж 500 экз. Заказ 67. Поз. плана 3н.

Издание распространяется **бесплатно**

Иркутский национальный исследовательский технический университет
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО "Иркутский национальный
исследовательский технический университет"

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

ИЗДАТЕЛЬСТВО

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2020