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

Том 23 № 6
2019

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

12+

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2019

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 23 № 6

2019

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2019

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 23 № 6

2019

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 российской прессы – 38237

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”, **2019**

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 23 No. 6

2019

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 the Russian Press – 38237

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”, 2019

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 23 № 6

2019

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание 1048

Машиностроение и машиноведение

Пашков А.Е., Ле Чи Винь, Нгуен Тхе Хоанг. Экспериментальное определение зависимости степени покрытия при дробеударном формообразовании от режимов обработки 1052

Портной А.Ю., Мищенков М.В. Исследование вибрационных характеристик обмоток тягового двигателя пульсирующего тока НБ – 514 1061

Рыжиков И.Н., Байроу Б. Программный комплекс для оценки влияния расстройки параметров рабочих колес турбомашин на их долговечность 1071

Солер Я.И., Прокопьева А.В., Дрожжин С.Н. Особенности формирования базы данных по силам резания для моделирования маятникового шлифования плоских поверхностей инструментов из сталей Р9М4К8 и Х12 1082

Тычинский А.В., Коровин Г.И., Гаврилин А.Н. Определение рациональных режимов торцевого фрезерования на основе снижения ударно-вибрационных воздействий 1093

Улаханов Н.С, Мишигдоржийн У.Л, Грешилов А.Д., Тихонов А.Г. Особенности формирования структуры, эксплуатационных свойств и качества поверхностного слоя штамповой оснастки из стали 3Х2В8Ф 1104

Федорещенко Н.В. Оптимизация радиуса приведения механизма актуатора для точного позиционирования в автоматическом производстве 1116

Энергетика

Константинов Г.Г., Ахмедов С.Б. Автоматизация проектирования турбогенераторов 1126

Морозов П.В., Морозов Ю.В. Распределение мощности между обмотками тяговых трансформаторов на основе цифровой фильтрации 1136

Новожилов Т.А., Новожилов А.Н., Юсупова А.О., Кропотин О.В., Ткаченко В.А., Бигун А.Я. Измерительные цепи системы диагностики эксцентриситета ротора 1145

Панкратьев П.С. Поддержка принятия решения о выборе пункта строительства тепловой электростанции на основе порогового метода многокритериального анализа. 1155

Пантелеев В.И., Труфакин С.С. Разработка методики рационального использования водных ресурсов Ангаро-Енисейского каскада гидроэлектростанций 1165

Фролов М.Ю., Фишов А.Г, Энхсайхан Э. Совместимость динамических характеристик традиционной и электронной генерации в электроэнергетических системах 1175

Швец С.В., Байшев А.В. Назначение шунтирующих диодов солнечной панели и методы их диагностики 1187

Металлургия и материаловедение

Гнатюк А.Н., Дунаев М.П. Структурная модель процесса ректификации бинарной смеси в тарельчатой колонне 1203

Горланов Е.С. Развитие технологии инертных катодов. Часть 2. Электрохимический синтез диборида титана 1212

Пискажова Т.В., Донцова Т.В., Блинов И.В. Моделирование работы печи гомогенизации для решения задач управления 1228

Хомоксонова Д.П., Антропова И.Г. Сравнительный анализ термохимического активирования молибденитового концентрата с магнезитом и бруситом 1247

Благодарность

Благодарность рецензентам 1247

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 23 No. 6

2019

CONTENTS

Contents 1049

Mechanical Engineering and Machine Science

- **Pashkov A.E, Le Tri Vinh, Nguyen The Hoang, Bludov V.V., Tyunkov V.V.** Experimental determination of coverage degree dependence on processing modes at shot peen forming 1052
- **Portnoi A.Yu, Mishchenkov M.V.** Studying vibration characteristics of NB-514 pulsed current traction motor windings 1061
- **Ryzhikov I.N., Beirow B.** Software package to estimate turbomachine impeller mistuning effect on blade durability 1071
- **Soler Ya.I, Prokopieva A.V., Drozhzhin S.N.** Features of cutting force database formation for modeling of pendulum grinding of flat surfaces of tools made of R9M4K8 and X12 steels 1083
- **Tychinsky A.V., Korovin G.I., Gavrilin A.N.** Determination of face milling rational modes based on shock-vibration effect reduction 1093
- **Ulakhanov N.S., Mishigdorzhiyn U.L., Greshilov A.D., Tikhonov A.G.** Formation features of structure, performance properties and surface layer quality of 3KH2V8F die steel tooling ... 1104
- **Fedoreshchenko N.V.** Actuator mechanism reduction radius optimization for precise positioning in automatic production 1116

Power Engineering

- **Konstantinov G.G, Akhmedov S.B.** Automation of turbogenerator design 1126
- **Morozov P.V., Morozov Yu.V.** Power distribution between traction transformer windings based on digital filtration 1136
- **Novozhilov T.A, Novozhilov A.N., Yusupova A.O., Kropotin O.V., Tkachenko V.A., Bigun A.Ya.** Measuring circuits of rotor eccentricity diagnostic system 1145
- **Pankratiev P.S.** Support of decision-making on TPP construction site selection based on the threshold method of multicriteria analysis 1155
- **Panteleev V.I., Trufakin S.S.** Developing methodology for rational use of Angara-Yenisei cascade HPP water resources 1165
- **Frolov M.Yu, Fishov A.G., Enkhsaikhan E.** Compatibility of traditional and electronic generation dynamic characteristics in electric power systems 1175
- **Shvets S.V., Baishev A.V.** Bypass diode function in solar panels and their diagnostic methods 1187

Metallurgy and Materials Science

- **Gnatyuk A.N., Dunaev M.P.** Structural model of binary mixture fractional distillation in a tray column 1203
- **Gorlanov E.S.** Development of inert cathode technology. Part 2. Electrochemical synthesis of titanium diboride 1212
- **Piskazhova T.V, Dontsova T.V., Blinov I.V.** Modeling homogenizing furnace operation to solve control tasks 1228
- **Khomoksonova D.P., Antropova I.G.** Comparative analysis of molybdenite concentrate thermochemical activation by magnesite and brucite 1237

Thanks

Thanks to reviewers 1247

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2019

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, 2019

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 621.98.042
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1052-1060

Экспериментальное определение зависимости степени покрытия при дробеударном формообразовании от режимов обработки

© А.Е. Пашков*, Ле Чи Винь*, Нгуен Тхе Хоанг*, В.В. Блудов, В.В. Тюньков*****
**Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*
***Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Россия*
****Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия*

Резюме: Цель – экспериментальное установление зависимости степени покрытия при дробеударном формообразовании от режимов обработки. Перспективным направлением в области формообразования длинномерных панелей и обшивок является использование дробеударной обработки. Данный метод позволяет достигнуть высокой точности получаемых контуров наряду с увеличением производительности процесса, реализацией эффекта упрочнения, повышающего усталостную прочность и долговечность деталей. Достижение необходимой точности формы при дробеударном формообразовании происходит с применением неполной степени покрытия обрабатываемой поверхности отпечатками дроби, что говорит об эффективности процесса производительности. Для назначения режима обработки актуален вопрос о необходимости в прогнозировании зависимости достигаемой степени покрытия. Применена методика планирования факторного эксперимента и расчета степени покрытия, основанная на измерении глубин отпечатков дроби с помощью трехмерного оптического сканирования. Получены фактические зависимости степени покрытия при дробеударном формообразовании от режимов дробеударной обработки.

Ключевые слова*:* степень покрытия, дробеударное формообразование, отпечатки, исследование поверхности, оптический метод трехмерного сканирования

Информация о статье: Дата поступления 22 октября 2019 г.; дата принятия к печати 19 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2019 г.

Для цитирования: Пашков А.Е., Ле Чи Винь, Нгуен Тхе Хоанг, Блудов В.В., Тюньков В.В. Экспериментальное определение зависимости степени покрытия при дробеударном формообразовании от режимов обработки. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 6. С. 1052–1060. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1052-1060

Experimental determination of coverage degree dependence on processing modes at shot peen forming

Andrey E. Pashkov, Le Tri Vinh, Nguyen The Hoang, Vasily V. Bludov, Vladislav V. Tyunkov
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
Baikal State University, Irkutsk, Russia
Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is experimental determination of the dependence of coverage degree at shot peen forming on processing modes. Shot peening is a promising direction in the field of shaping long panels and skins. This method allows to achieve high accuracy of received contours along with the increased efficiency of the process and implemented strengthening effect that improves the fatigue strength and durability of parts. The required accuracy of the shape is achieved in shot peening with the use of an incomplete coverage degree of the processed surface by shot indents, which indicates the efficiency of the production process. The question of the need for the prediction of the dependence of the achieved coverage degree is important when selecting the processing mode. The method of planning a factorial experiment and calculating the coverage degree based on the measurement of shot indent depths using the three-dimensional optical scanning is applied. The actual dependences of the coverage degree on shot peening modes at shot peen forming are obtained.

Keywords*:* degree of (shot) coverage, shot peening, indents, surface study, optical method of three-dimensional scanning

Information about the article: Received October 22, 2019; accepted for publication November 19, 2019; available online December 28, 2019.

For citation: Pashkov AE, Le Tri Vinh, Nguyen The Hoang, Bludov VV, Tyunkov VV. Experimental determination of coverage degree dependence on processing modes at shot peen forming. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1052–1060. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1052-1060

1. ВВЕДЕНИЕ

В самолетостроении для получения сложных криволинейных форм поверхностей панелей и обшивок эффективно применяется способ дробеударного формообразования[1] [1–6]. При этом важнейшим из технологических параметров процесса обработки является степень покрытия (отношение площади отпечатков дроби на исследуемом участке ко всей его площади).

В производственных условиях используют несколько методов определения степени покрытия после дробеударной обработки [4, 7, 8]. Однако все эти способы сводятся к определению фактического заполнения участка поверхности детали отпечатками дроби, т.е. в настоящее время нет данных для прогнозирования степени покрытия в зависимости от задаваемых технологических режимов.

2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ПОКРЫТИЯ ПРИ ДРОБЕУДАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

При дробеударной обработке (от ударов дроби об обрабатываемую поверхность) образуются многочисленные отпечатки различных диаметров и глубин. При этом распределение отпечатков дроби на рассматриваемом участке является случайным, а количество и размеры отпечатков зависят от многочисленных факторов, включая режимы обработки, физико-механические свойств дроби, обрабатываемого материала и др. [1–4, 7–13]. В связи с данным многофактораным влиянием на степень покрытия, теоретическое ее прогнозирование достаточно проблематично. Следовательно, эксперимательное установление зависимости степени покрытия отпечатками дроби от режимов обработки является более предпочтительным. Получаемая зависимость будет необходимой для технологов в качестве инструмента для прогнозирования степени покрытия и назначения необходимого режима для наиболее распространенного материала перед реализацией дробеударной обработки.

Анализ литературных данных показал, что способ определения степени покрытия по фактической глубине отпечатков отсканированной обработанной дробью поверхности на бесконтактном оптическом интерференционном профилометре ContourGT-K1 в настоящее время является наиболее предпочтительным благодаря высокой точности и малой трудоемкости. Согласно данному способу, степень покрытия определяется следующим образом:

На рис. 1 показана схема формирования отпечатка дроби.

Так как форма отпечатков близка к сферической с незначительными наплывами по периферии отпечатка [7, 8], то радиус отпечатка дроби в плане определяется по средней линии профиля микронеровностей поверхности следующей формулой:

$$r_i = \sqrt{R_s^2 - (R_s - h_i)^2}. \qquad (1)$$

Таким образом, расчетная степень покрытия K_c на основании измеренных значений глубин отпечатков дроби определяется следующей зависимостью:

$$K_c = \frac{\pi}{F_{об}} . \sum_{i=1}^{n} (R_s^2 - (R_s - h_i)^2), \qquad (2)$$

[1]Макаров В.И. Формообразование обводообразующих элементов летательных аппаратов методом дробеударной обработки и компенсирующей гибки – прокатки: дис. … канд. техн. наук: 05.07.04. М.: МАИ, 1990. 21 с.

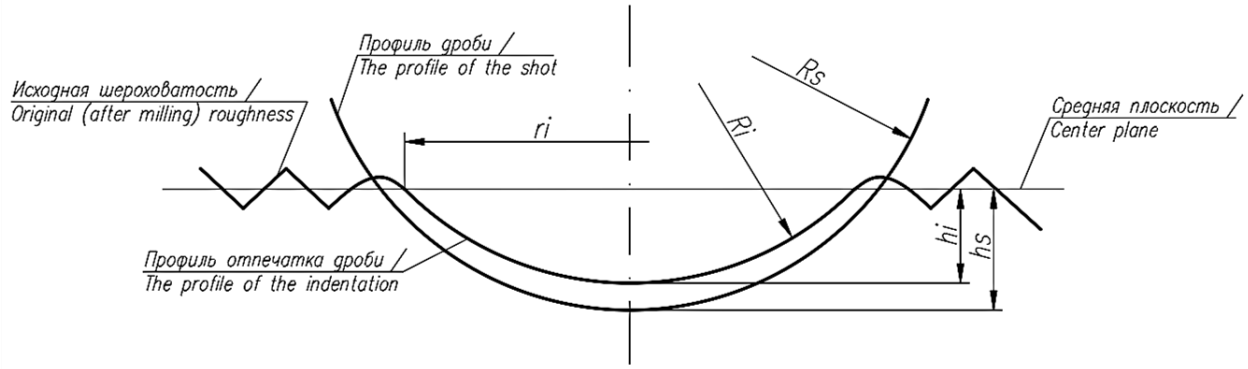


Рис. 1. Схема образования отпечатка при дробеударном формообразовании: R_s – радиус i-го отпечатка дроби после внедрения (до упругого восстановления); R_i – радиус i-го отпечатка дроби после упругого восстановления; r_i – радиус отпечатка в плане на средней плоскости от исходной шероховатости; h_s –геометрическая глубина внедрения дроби; h_i–глубина отпечатка дроби после упругого восстановления

Fig. 1. Diagram of indent formation at shot peening: R_s – the radius of the i-th indent of the shot after introduction (before elastic recovery); R_i – the radius of the i-th indent of the shot after elastic recovery; r_i – the radius of the indent in the plan on the central plane from the initial roughness; h_s – the geometric depth of shot indentation; h_i – the depth of the shot indent after elastic recovery

где K_c – расчетная степень покрытия; $F_{об}$ – общая площадь исследуемого участка; i – номер отпечатка; n – количество отпечатков дроби на исследуемой площади.

3. ЭСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ ПОКРЫТИЯ ПРИ ДРОБЕУДАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Для установления зависимости степени покрытия от режимов обработки по высшеуказанному способу были проведены эспериментальные иследования на образцах из алюминиевого сплава В95 в виде пластины размером 100х100х5 мм. Образцы до дробеобработки были профрезерованы до требуемой чистоты поверхности. Дробеобработка образцов проведена на установке контактного типа УДФ-4. Режимы и условия обработки приведены в табл. 1.

После дробеударной обработки в каждом образце были выделены 3 различные зоны, и в каждой проведены измерения глубин отпечатков с определением степени покрытия на участках 10х10, 15х15, 20х20 мм, которые показаны на рис. 2.

Таблица 1

Данные для экспериментального определения степени покрытия

Table 1

Data for experimental determination of the coverage degree

№	Размер дроби	Частота вращения дробеметного колеса, об/мин	Продольная подача, м/мин	Размер образцов, мм	Материал образцов
1	3,5	600	1,05	100х100х5	В95
2		600	2,5		
3		600	3,95		
4		800	1,05		
5		800	2,5		
6		800	3,95		
7		1000	1,05		
8		1000	2,5		
9		1000	3,95		

ISSN 1814-3520

Всего обработан 81 участок на 9 образцах. Результаты сканирования, измерений и расчетов средней степени покрытия по (2) представлены в табл. 2.

На основании полученных результатов (см. табл. 2) были построены зависимости степени покрытия от частоты вращения дробеметного колеса при продольной подаче 1,05, также 2,5 и 3,95 м/мин с точностью аппроксимации не менее 97% (рис. 3), а также зависимости степени покрытия от продольной подачи дробеметного колеса при его частоте вращения 600, 800 и 1000 об/мин с точностью аппроксимации не менее 91% (рис. 4).

По данным рис. 3, 4 можно заключить, что при дробеударной обработке степень покрытия отпечатками дроби на обрабатываемой поверхности прямо пропорциональна частоте вращения дробеметного колеса, но обратно пропорциональна продольной подаче. Это объясняется тем, что при росте частоты вращения увеличиваются скорость дроби и размеры отпечатков, а при повышении подачи снижаются время обработки и количество отпечатков на рассматриваемом участке.

Графики, показанные на рис. 3, 4, носят частный характер. Для получения единой зависимости степени покрытия от режима обработки был построен факторный план эксперимента в отношении двух переменных факторов (продольная подача и частота вращения дробеметного колеса (рис. 5) [14]. Результаты реализации плана эксперимента показаны в табл. 3.

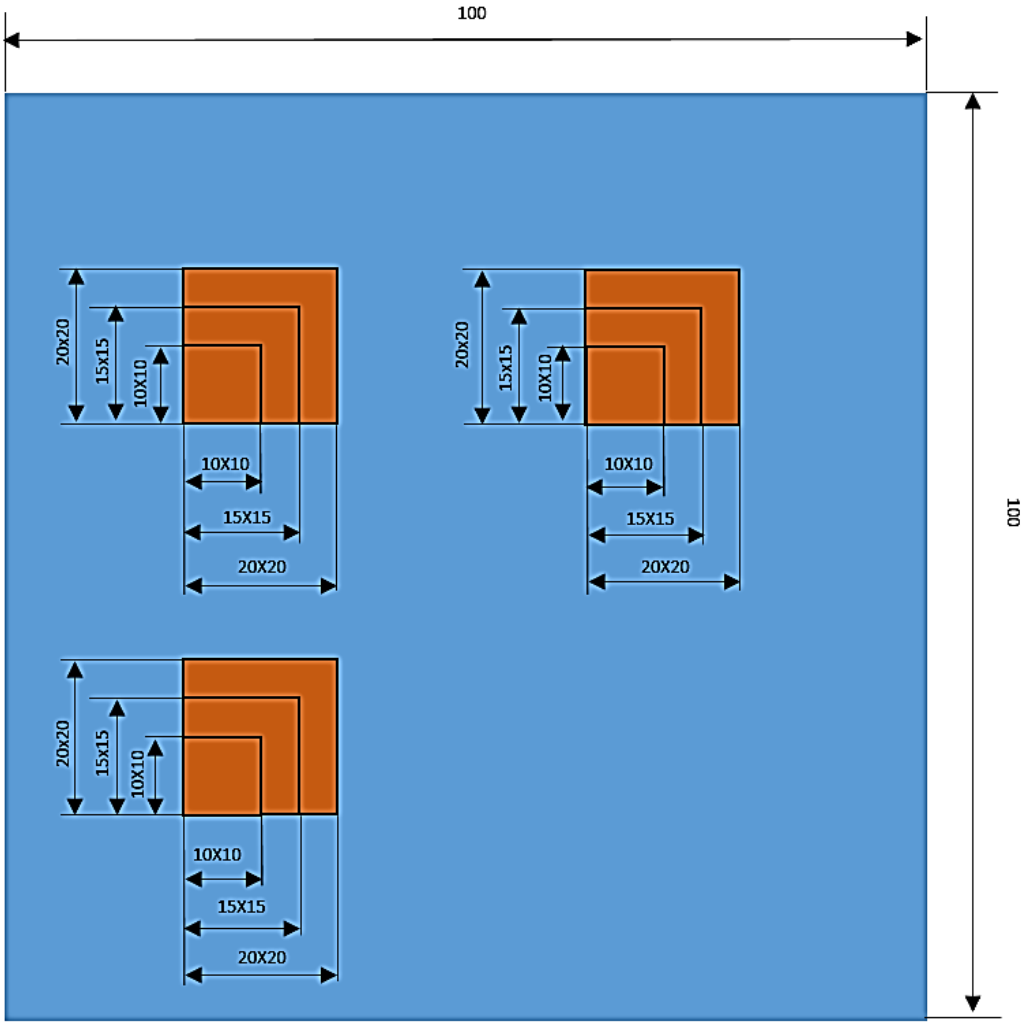


Рис. 2. Выделенные участки для измерений и определения степени покрытия
Fig. 2. Selected areas for measuring and determining the coverage degree

Таблица 2

Результаты измерений и расчетов фактической степени покрытия в зависимости от режимов дробеударной обработки

Table 2

Measurement and calculation results of the actual coverage degree depending on shot peening modes

№ образца	Режим обработки		Размер участков, мм х мм	Степень покрытия в каждой зоне			Средние степени покрытия, %
	f, об/мин	s, м/мин		зона 1	зона 2	зона 3	
1	600	1,05	10x10	15,5935	16,1540	16,9257	16,2244
			15x15	14,1331	15,0070	15,6579	14,9326
			20x20	14,1652	13,9528	14,7455	14,2878
2	600	2,5	10x10	8,1711	7,3422	6,0514	7,1882
			15x15	6,9430	6,7633	6,1103	6,6056
			20x20	6,0955	5,8023	5,4567	5,7848
3	600	3,95	10x10	3,7762	6,5895	4,5110	4,9589
			15x15	3,7759	4,4194	3,9945	4,0633
			20x20	3,4924	3,7579	3,2732	3,5078
4	800	1,05	10x10	18,3455	16,3361	18,6208	17,7675
			15x15	16,1704	16,7997	17,5342	16,8348
			20x20	16,1056	16,4543	16,5692	16,3764
5	800	2,5	10x10	8,1477	8,6422	9,7776	8,8558
			15x15	8,3267	8.,4414	9,0498	8,6060
			20x20	7,7233	7,8281	8,2892	7,9469
6	800	3,95	10x10	6,8582	6,4168	5,4422	6,2391
			15x15	5,6247	5,7603	6,2566	5,8806
			20x20	5,2270	5,1135	5,6599	5,3335
7	1000	1,05	10x10	18,6273	19,1083	19,7353	19,1570
			15x15	18,2719	18,9787	19,0637	18,7714
			20x20	18,0760	18,5096	18,1690	18,2515
8	1000	2,5	10x10	10,9942	10,6068	11,3225	10,9745
			15x15	11,9340	11,5888	10,6753	11,3993
			20x20	10,9220	10,6250	10,2815	10,6095
9	1000	3,95	10x10	7,7896	7,3868	6,7281	7,3015
			15x15	7,4346	7,1177	6,0075	6,8533
			20x20	6,7610	6,8126	6,3664	6,6467

Параметры полного факторного эксперимента и результаты измерений и расчетов степени покрытия представлены в табл. 3.

В результате обработки данных полного факторного эксперимента и необходимой проверки адекватности при обработке данных построена зависимость степени покрытия от режима обработки [15; с. 54–60]:

$$K_p = 12,54 + 0,01 \cdot f - 3,206 \cdot s - 0,0009 \cdot f \cdot s. \quad (3)$$

Зависимость (3) позволяет определить степень покрытия относительно частоты вращения дробеметного колеса и продольной подачи для дробеударной обработки алюминиевого сплава В95 стальной дробью диаметром 3,5 мм.

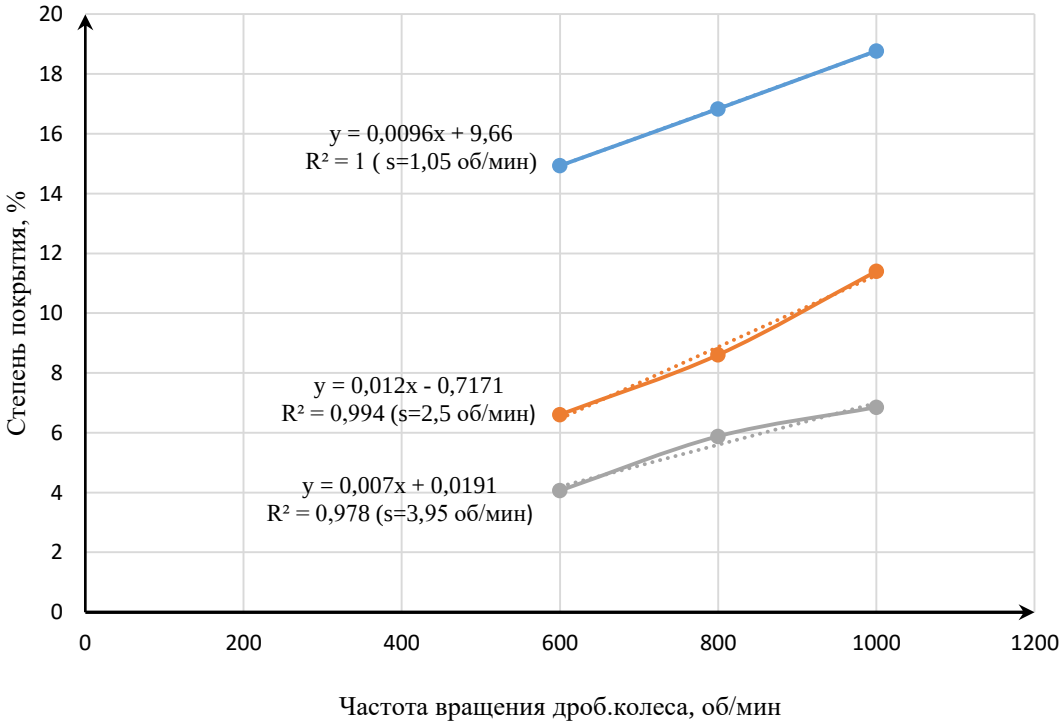


Рис. 3. Зависимость степени покрытия от частоты вращения дробеметного колеса при продольной подаче 1,05, 2,5 и 3,95 м/мин
Fig. 3. Degree of coverage vs rotation speed of the shot blasting wheel at the longitudinal feed of 1.05, 2.5 and 3.95 m/min

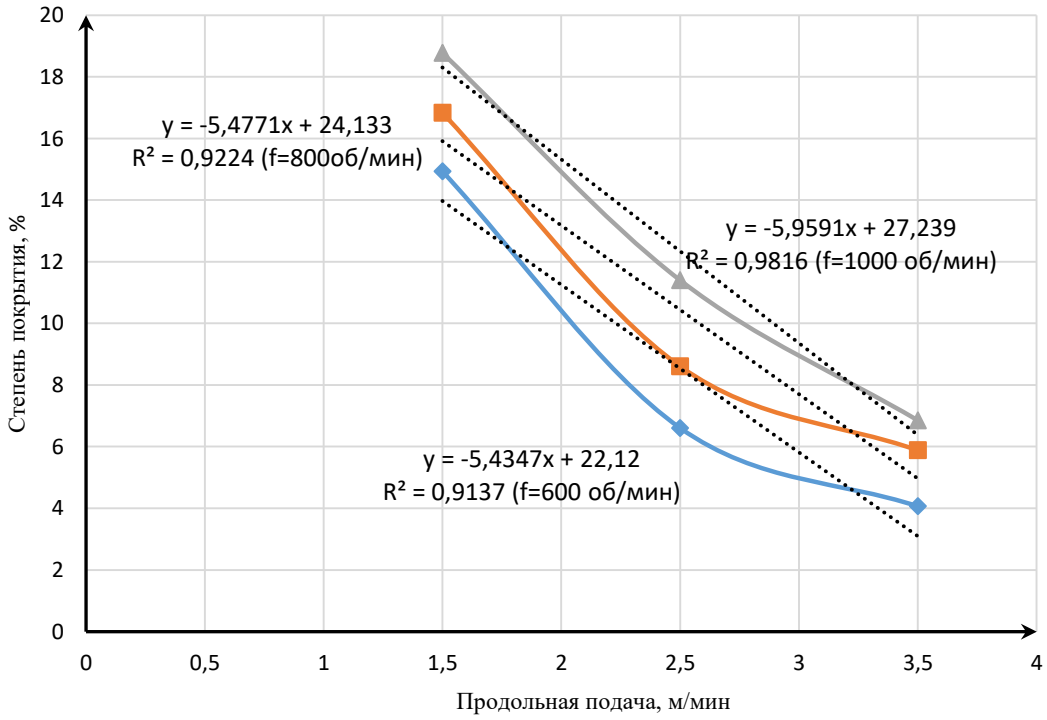


Рис. 4. Зависимость степени покрытия от продольной подачи дробеметного колеса при частоте вращения дробеметного колеса 600, 800 и 1000 об/мин
Fig. 4. Degree of coverage vs longitudinal feed of the shot blasting wheel at the rotation speed of the shot blasting wheel of 600, 800 and 1000 rpm

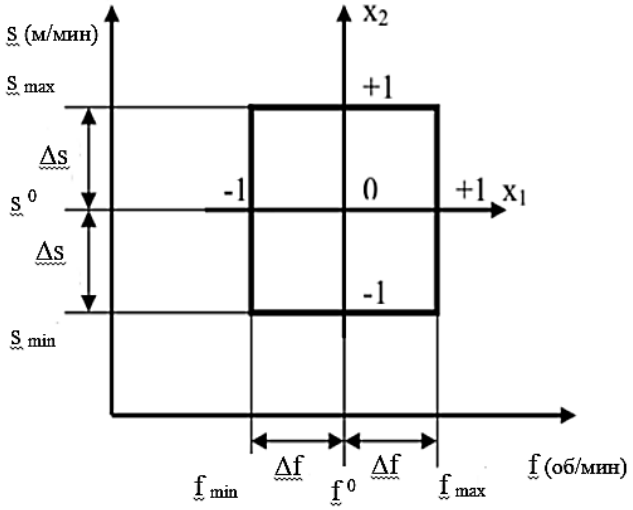


Рис. 5. Полный факторный эксперимент 2^2
Fig. 5. Full factorial experiment 2^2

Таблица 3

Результаты измерений и расчетов по факторам

Table 3

Measurement and calculation results by factors

№ опыта	Факторы в натуральном масштабе		Факторы в безразмерной системе координат				Степень покрытия K, %
	f, об/мин	s, м/мин	x_0	x_1	x_2	$x_1.x_2$	
1	600	1,05	+1	-1	-1	+1	14,9326
2	1000	1,05	+1	+1	-1	-1	18,7714
3	600	3,95	+1	-1	+1	-1	4,0633
4	1000	3,95	+1	+1	+1	+1	6,8533

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При дробеударной обработке степень покрытия прямо пропорциональна частоте вращения дробеметного колеса, но обратно пропорциональна продольной подаче.

Построенная зависимость степени покрытия (3) дает возможность прогнозировать степень покрытия при обработке алюминиевого сплава В95 стальной дробью диаметром 3,5 мм для практически всех производственных диапазонов частоты вращения дробеметного колеса и продольной подачи на дробеударной установке контактного типа ДУФ-4.

Библиографический список

1. Пашков А.Е. Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. 138 с.
2. Чапышев А.П. Статистическое описание поверхности после дробеударного формообразования // Перспективные технологии получения и обработки материалов: матер. региональной науч.-техн. конф. (г. Иркутск, 25–26 сентября 2004 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. С. 42–46.
3. Пашков А.Е., Чапышев А.П. Учет влияния структуры зоны обработки при дробеударном формообразовании // Технологическая механика материалов: межвузовский сб. науч. тр. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003. С. 22–27.
4. Пашков А.Е., Чапышев А.П. Экспресс-метод контроля сплошности покрытия при дробеударном формообразовании // Инструмент и технологии XXI века: сб. докладов междунар. семинара (г. Иркутск, 12–14 марта 2002 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2002. С. 117–120.
5. Матлин М.М., Мосейко В.В. Выбор степени покрытия отпечатками дроби и зонами пластической деформации упрочняемых поверхностей деталей машин при дробеобработке // Упрочняющие техно-

логии и покрытия. М.: Машиностроение. 2008. № 9. С. 23–27.
6. Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А., Кольцов В.П., Нгуен Тхе Хоанг. Определение степени покрытия после дробеударного формообразования методом обработки изображений // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2. С. 32–37. https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-32-37
7. Матлин М.М., Мозгунова А.И., Лебский С.Л. Прогнозирование параметров упрочнения деталей машин путем поверхностного пластического деформирования // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2005. № 3. С. 52–55.
8. Матлин М.М., Мосейко В.О., Мосейко В.В. Вероятностная оценка параметров потоков дроби при дробеобработке с целью поверхностного упрочнения // XIV Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященные 300-летию Санкт-Петербурга: сб. тез. (г. Санкт-Петербург, 12–14 марта 2003 г.). Санкт-Петербург, 2003. С. 58–59.
9. Гребенников Д.С., Максименков В.И. Формообразование панелей крыла дальнемагистрального самолета // Вестник Воронежского государственного технического универститета. 2019. Т. 15. № 1. С. 116–121. https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.1.018
10. Дрозд М.С., Осипенко А.П. Аналитическое исследование напряженного состояния при внедрении упругой сферы в упруго-пластическое полупространство // Металловедение и прочность металлов: сб. науч. тр. Волгоград: ВПИ, 1977. Вып. 8. С. 58–68.
11. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
12. Дрозд М.С., Фёдоров А.В., Сидякин Ю.И. Расчет глубины распределения пластической деформации в зоне контакта тел произвольной кривизны // Вестник машиностроения. 1972. № 1. С. 54–57.
13. Братухин А.Г., Халимулин Р.М., Юнусов Ф.С. Размерное и безразмерное формообразование поверхностей деталей. М.: Машиностроение, 1996. 270 с.
14. Сидняев Н.И. Введение в теорию планирования эксперимента. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 463 с.
15. Фёрстер Э., Рёнц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа / пер. с нем. М.: Финансы и статистика, 1983. 304 с.

References

1. Pashkov AE. *Technological connections in the manufacturingprocess of long sheet metal parts*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University, 2005. 138 p. (In Russ.)
2. Chapyshev AP. Surface statistical description after shot peening. *Perspektivnyye tekhnologii polucheniya i obrabotki materialov: materialy regional'noy nauchno-tekhnicheskon konferentsii* = *Advanced technologies for the production and processing of materials: proceedings of the regional scientific and technical conference*. 25–26 September 2004, Irkutsk, Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2004, p. 42–46. (In Russ.)
3. Pashkov AE, Chapyshev AP. Consideration of the influence of the treatment area structure during shot peen forming. In: *Tekhnologicheskaya mehanika materialov: mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov* = Technological mechanics of materials: interuniversity collection of scientific works. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2003. p.22–27. (In Russ.)
4. Pashkov AE, Chapyshev AP. Express control method of coating continuity at shot peen forming. *Instrument i tekhnologii XXI veka: sbornik dokladov mezhdunarodnogo seminara* = Tools and technologies of the XXI century: collection of international seminar reports, 12–14 March, 2002, Irkutsk, Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2002, pp. 117–120. (In Russ.)
5. Matlin M.M., Moseyko V.O., Moseyko V.V. Choice the degree of coverage by shot prints and plastic deformation zones of strengthening machine parts surfaces under shotpeening. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* = Strengthening technologies and coatings. Moscow: Mashinostroenie. 2008;9:23–27. (In Russ.)
6. Le Chi Vinh, Starodubtseva DA, Koltsov VP, Nguyen The Hoang. Determination of a degree of shot coverage after shot peen forming by image processing. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies. 2018;2:32–37. https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-32-37 (In Russ.)
7. Matlin MM, Mozgunova AI, Lebskij SL. Prediction of machine part strengthening parameters by surface plastic deformation. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Izvestia VSTU. 2005;3:52–55. (In Russ.)
8. Matlin MM, Mosejko VO, Mosejko VV. Probabilistic estimation of shot flow parameters at shot peening for the purpose of surface strengthening. *HIV Peterburgskie chteniya po problemam prochnosti, posvyashchennye 300-letiyu Sankt-Peterburga: sbornik tezisov* = XIV St. Petersburg readings on the problems of strength dedicated to St. Petersburg's 300th anniversary: collection of abstracts, 12–14 March 2003, Sankt-Peterburg, Sankt-Peterburg; 2003, p.58–59. (In Russ.)
9. Grebennikov DS, Maksimenkov VI. Shaping wing panels of a long-haul aircraft. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstennogo tekhnicheskogo universtiteta* = Bulletin of Voronezh state technical University. 2019;15(1):116–121. (In Russ.) https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.1.018
10. Drozd MS, Osipenko AP. Analytical study of the stress state when introducing the elastic sphere in the elastic-plastic half-space. In: *Metallovedenie i prochnost' metallov: sbornik nauchnyh trudov* = Metallurgical science and strength of metals: collection of scientific papers. Volgograd: Volgograd Polytechnic Institute; 1977, Issue 8, p.58–68. (In Russ.)
11. Drozd MS, Matlin MM, Sidyakin YuI. *Engineering calculations of elastic-plastic contact deformation*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1986. 224 p. (In Russ.)
12. Drozd MS, Fedorov AV, Sidyakin YuI. Calculation of depth of plastic deformation distribution in the contact zone of arbitrary curvature bodies. *Vestnik mashinostroeniya* = Bulletin of Mechanical Engineering.

1972;1:54–57. (In Russ.)
13. Bratukhin AG, Kalimulin RM, Yunusov FS. *Dimensional and dimensionless forming of part surfaces*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1996. 270 p. (In Russ.)
14. Sidnyaev NI. *Introduction to the theory of experiment planning.* Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2011. 463 p. (In Russ.)
15. Förster E, Rents B. Methods of correlation and regression analysis, 1983, 304 p. (Russ. ed.: *Metody korrelyacionnogo i regressionnogo analiza*. Moscow, Finance and statistics, 1983, 304 p.).

Критерии авторства

Пашков А.Е., Ле Чи Винь, Нгуен Тхэ Хоанг, Блудов В.В., Тюньков В.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Pashkov A.E., Le Tri Vinh, Nguyen The Hoang, Dludov V.V., Tyunkov V.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.

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

Пашков Андрей Евгеньевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой технологии и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: pashkov@ex.istu.edu

Ле Чи Винь,
кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: vinh_istu@mail.ru

Нгуен Тхэ Хоанг,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: nguyenthehoang05091993@gmail.com

Блудов Василий Васильевич,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры математики и информатики,
Байкальский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, Россия;
e-mail: vasily-bludov@yandex.ru

Тюньков Владислав Владимирович,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15, Россия;
e-mail: tunkov@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey E. Pashkov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Mechanical Engineering Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: pashkov@ex.istu.edu

Le Tri Vinh,
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: vinh_istu@mail

Nguyen The Hoang,
Master Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: nguyenthehoang05091993@gmail.com

Vasily V. Bludov,
Doctor of physical and mathematical Sciences,
Professor of the Department
of Mathematics and Informatics
Baikal state University
11, Lenina St., Irkutsk 664003, Russia;
e-mail: vasily-bludov@yandex.ru

Vladislav V. Tyunkov,
Doctor of technical Sciences,
Professor of the Department of Railway Cars and Railway Car Economy,
Irkutsk state University of Railways
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: tunkov@bk.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 629.423.31; 62-192; 629.4.032
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1061-1070

Исследование вибрационных характеристик обмоток тягового двигателя пульсирующего тока НБ-514

© А.Ю. Портной, М.В. Мищенков
Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – исследование вибрационных характеристик обмоток тягового двигателя пульсирующего тока НБ-514 для выявления причин преждевременного отказа обмоток полюсов с целью повышения надежности в условиях эксплуатации. Проведено исследование амплитудно-частотных характеристик вибрации обмоток тягового двигателя пульсирующего тока НБ-514; преобразование аналогового сигнала вибрации в цифровой код с последующими методами цифровой обработки сигналов. Создан стенд для исследования вибрационных характеристик, с помощью которого было проведено измерение амплитудных и частотных характеристик вибраций тягового электродвигателя. На основе полученных измерений был сделан анализ результатов измерений, который показал, что на частотах вблизи 100, 200, 400, 500 и 600 Гц имеются электромеханические резонансы с высокой степенью добротности компенсационной обмотки тягового двигателя НБ-514 и точек соединения его обмоток и шины щеткодержателя.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, НБ-514, обмотки двигателя, вибрационная диагностика, вибрация, резонанс

Информация о статье: Дата поступления 20 августа 2019 г.; дата принятия к печати 26 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2019 г.

Для цитирования: Портной А.Ю., Мищенков М.В. Исследование вибрационных характеристик обмоток тягового двигателя пульсирующего тока НБ-514. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2019. Т. 23. № 6. С. 1061–1070. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1061-1070

Studying vibration characteristics of NB-514 pulsed current traction motor windings

Aleksandr Yu. Portnoi, Maksim V. Mishchenkov
Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the article is to study the vibration characteristics of the windings of NB-514 pulsed current traction motor to identify the causes of early failure of the pole windings in order to improve their reliability in operation. The amplitude-frequency characteristics of NB-514 pulsed current traction motor winding vibration are studied; the analog vibration signal is converted into a digital code, which follows by the signal processing by digital methods. To study vibration characteristics a test bench is created, which enables the measurement of amplitude and frequency characteristics of traction motor vibrations. The analysis of the obtained measurements has shown that there are electromechanical resonances with a high degree of q-factor of the compensating winding of NB-514 traction motor and connection points of its windings and the brush holder bus at the frequencies close to 100, 200, 400, 500 and 600 Hz.

Keywords*: traction motor, NB-514, motor windings, vibration diagnostics, vibration, resonance*

Information about the article: Received August 20, 2019; accepted for publication November 26, 2019; available online December 28, 2019.

For citation: Portnoi AYu, Mishchenkov MV. Studying vibration characteristics of NB-514 pulsed current traction motor windings. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1061–1070. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1061-1070

1. ВВЕДЕНИЕ

Диагностика технического состояния узлов тягового подвижного состава в условиях эксплуатации занимает одно из важных мест. Особенно это актуально в настоящее время, когда возрастающие объемы грузовых перевозок, скорости движения и

плотности трафика тягового подвижного состава [1] ставят задачу повышения надежности в условиях интенсивной тяговой и вибрационной нагрузки.

Рассматриваемый в работе тяговый двигатель НБ-514 устанавливается на электровоз ВЛ85, а его модификации – на электровозы 2Э5К и 3ЭС5К «Ермак», являющиеся на сегодняшний день основными грузовыми электровозами переменного тока.

Согласно статистике, весомую долю неисправностей тяговых электродвигателей занимает неисправность изоляции обмоток полюсов, а именно – механическое повреждение изоляции, межвитковое замыкание, пробой изоляции обмоток на корпус. Длительные ремонтные работы, связанные с указанными неисправностями и последующей полной разборкой тяговых электродвигателей, несут за собой дополнительное повышение расходов средств на проведение ремонта, а также расходов за счет простоя локомотивов на время ремонта.

Следует отметить, что важную роль в остаточном ресурсе занимает именно состояние изоляции электродвигателей. В связи с этим возникает необходимость выявления причин преждевременного отказа обмоток полюсов тягового электродвигателя с целью повышения надежности в тяжелых условиях эксплуатации.

В специализированной литературе по вибрации, например, в работах [2–7], недостаточно раскрыт вопрос о надежности изоляции в условиях вибрации высокой амплитуды. Тем не менее, в исследованиях [7–14] затрагивается тема вибрации обмоток с точки зрения математических моделей.

В плане технических решений были найдены источники реализации для исследования обмоток электродвигателей, в частности в патенте [15] рассматривается способ акустической диагностики изоляции, обладающий существенным недостатком – малой чувствительностью, т.к. измерения производятся непосредственно с корпуса электродвигателя, а корпус в некотором плане является экранирующим элементом. Такая же реализация выполнена в работе [16] – датчики вибрации крепятся непосредственно к корпусу. В патенте [17] описывается способ динамического контроля внутренних параметров систем электродвигателя, заключающийся в использовании волоконно-оптического кабеля, встроенного в изоляцию, недостатком такого способа является сложность реализации, и к тому же нет необходимости постоянного измерения параметров вибрации.

Задачами данного исследования являются проектирование стенда для исследования амплитудных и частотных характеристик вибрации обмоток тягового двигателя пульсирующего тока НБ-514, что позволит выявить проблемы с точки зрения вибрации обмоток, приводящих к преждевременной потере надежности изоляции этих обмоток.

2. ОПИСАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ И ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА

По своему назначению тяговый электродвигатель пульсирующего тока в электровозах ВЛ85 и 2(3)ЭС5К «Ермак» подключен к выпрямительно-инверторному преобразователю, который по своему устройству является мощным источником гармоник с частотами, кратными 100 Гц в сторону нагрузки.

В режиме тяги электровоза обмотки последовательно подключены к выпрямительно-инверторному преобразователю. В режиме рекуперативного торможения обмотка якоря подключена к выпрямительно-инверторному преобразователю, а обмотка возбуждения – к выпрямительной установке возбуждения.

Силовая схема выпрямительно-инверторного преобразователя и выпрямительной установки возбуждения электровоза изображена на рис. 1 *а*.

Выпрямительно-инверторный преобразователь предназначен для выпрямления однофазного переменного тока с частотой 50 Гц в постоянный, плавного регулирования напряжения питания тяговых двигателей в режиме тяги и преобразова-

ния постоянного тока в однофазный переменный ток частотой 50 Гц и плавного регулирования против электродвижущей силы инвертора в режиме рекуперативного торможения.

Очередность открытия плеч выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) в выпрямленном (тяга) и инверторном (рекуперация) режимах определяется алгоритмом работы системы управления преобразователями электровоза, что подробно описано в работе «Электровоз ВЛ85: руководство по эксплуатации»[1].

Очевидно, ВИП и выпрямительная установка возбуждения имеют напряжение с основной частотой 100 Гц и большим процентом гармоник.

Напряжение наблюдается на выходе ВИП в I и III зонах тяги (рис. 1 *b*, рис. 1 *c*) и в IV зоне рекуперативного торможения (рис. 1 *d*).

Схема соединения полюсных катушек тягового двигателя, представленная в источнике на рис. 2, имеет следующее соединение: обмотки главных полюсов соединены последовательно. Дополнительные полюса соединяются последовательно, а также поэтапно с компенсационной обмоткой и якорем (ротором) двигателя. Концы катушек С1-С2 и Я1-Д2 выведены в расположенную на остове коробку выводов.

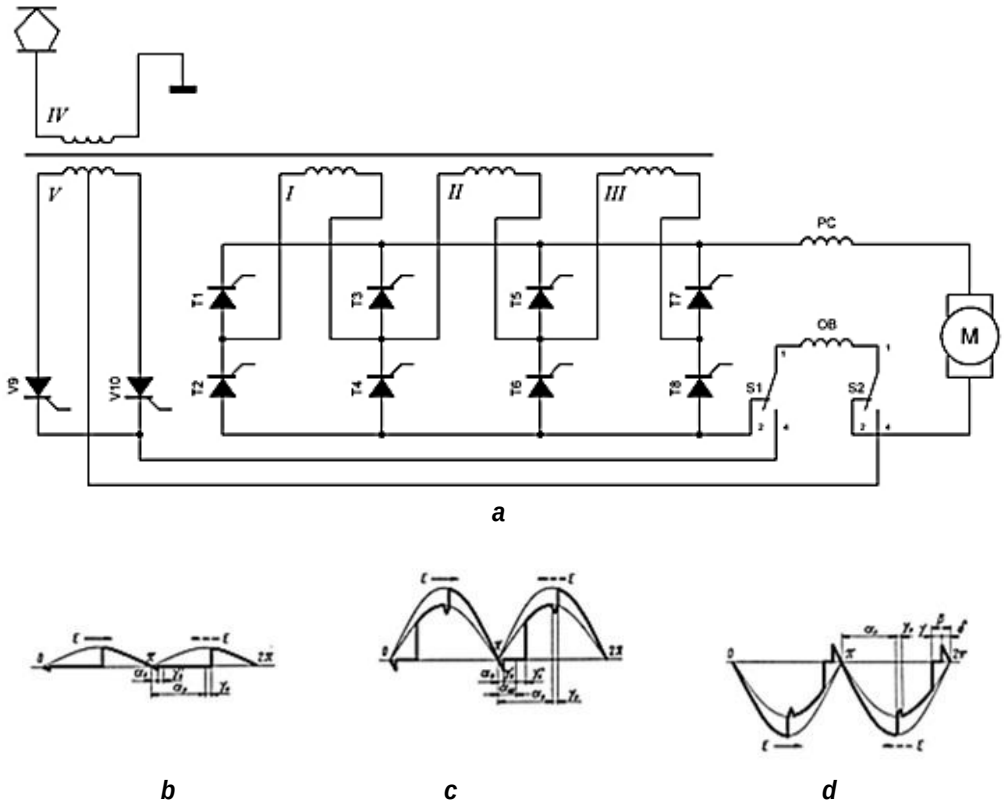


Рис. 1. Выпрямительно-инверторный преобразователь и выпрямительная установка возбуждения электровоза: a – схема электрическая принципиальная; b – диаграмма напряжения в тяговом режиме на 1-й зоне регулирования; c – диаграмма напряжения в тяговом режиме на 3-й зоне регулирования; d – диаграмма напряжения в режиме рекуперации

Fig. 1. Rectifier-inverter converter and rectifying unit of electric locomotive excitation: a – schematic circuit diagram; b – voltage diagram in traction mode on the 1st control zone; c – voltage diagram in traction mode on the 3rd control zone; d – voltage diagram in recuperation mode

[1]Тушканов Б.А., Пушкарев Н.Г., Позднякова Л.А. Электровоз ВЛ85: руководство по эксплуатации. М.: Транспорт, 1992. 480 с.

Средствами системы трехмерного проектирования была создана модель электродвигателя, где отмечены точки и направления измерения вибрации. Схема точек и направлений измерений вибрации представлена на рис. 2.

Точки и направления измерений обусловлены тем, что в выбранных местах есть возможность открытого доступа для проведения измерения вследствие частичного выхода шин обмоток наружу. Доступ обеспечивается через технологические люки для воздушного охлаждения как со стороны щеточно-коллекторного узла, так и с противоположной ему стороны, через которые наблюдаются места соединения обмоток, сам щеточно-коллекторный узел, а также частично выходящие наружу обмотки полюсов электродвигателя, что позволяет провести необходимые измерения.

Из всех возможных способов крепления вибродатчиков в данном случае доступен только способ ручного щупа, т.к. способ крепления на шпильку или магнит затруднен. Перед измерением места установки вибродатчиков были маркированы, а места соединений обмоток – пронумерованы.

Измерения проводились непосредственно на корпусной изоляции обмоток полюсов тягового электродвигателя, это обусловлено тем, что корпусная изоляция и обмотка, намотанные в несколько слоев изоляции, пропитаны эпоксидным компаундом и являются цельным монолитом. В тяговом электродвигателе НБ-514 применены следующие типы изоляции и их комбинации[1]: слюдинитовая лента, бумага асбестовая, фторопластовая пленка, стеклолента, электронит, эпоксидный компаунд. Также можно отметить, что основополагающими направлениями в выборе изоляции в электродвигателе НБ-514 лежат диэлектрическая прочность и нагревостойкость, а механической прочности в реальных динамических условиях уделено мало внимания.

3. СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИИ ОБМОТОК ДВИГАТЕЛЯ

На рис. 3 представлена функциональная схема стенда для исследования вибрационных характеристик.

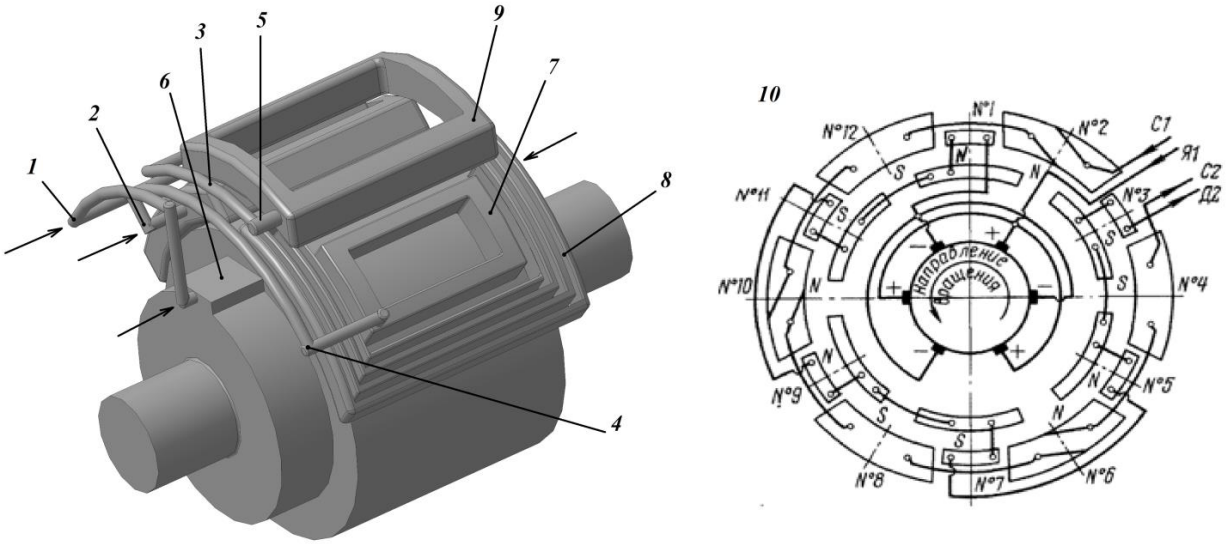


Рис. 2. Точки и направления измерения вибрации: 1 – точка соединений № 1; 2 – точка соединений № 2; 3 – точка соединений № 3; 4 – точка соединений № 4; 5 – точка соединений № 5; 6 – шина щеткодержателя; 7 – дополнительный полюс; 8 – компенсационная обмотка; 9 – главная обмотка; 10 – схема соединения обмоток полюсов

Fig. 2. Points and directions of vibration measurement: 1 – connection point no. 1; 2 – connection point no. 2; 3 – connection point no. 3; 4 – connection point no. 4; 5 – connection point no. 5; 6 – brush holder bus; 7 – additional pole; 8 – compensating winding; 9 –main winding; 10 –diagram of pole windings arrangement

Стенд состоит из:

– генератора постоянного тока 2, позволяющего задавать ток в пределах 20–100 А на обмотке возбуждения двигателя;

– источника питания мостовой схемы 1, позволяющего получать напряжение около 10 В с током до 20 А;

– мостовой схемы 4, выполненной на силовых транзисторах, подключенной с одной стороны к источнику питания 1, в диагональ которой включаются обмотки якоря тягового двигателя;

– блока управления стендом 6, основанном на микроконтроллере ADuC842, предназначенного для управления мостовой схемой, приема информации с датчика вибрации, фильтрации сигнала с использованием методов цифровой обработки сигнала и вывода информации на персональный компьютер (ПК);

– датчика вибрации 7 AP2038-100 с чувствительностью каналов 10 $\text{мВ}/\text{мс}^{-2}$;

– персонального компьютера 5, предназначенного для считывания информации и дальнейшей ее обработки;

– источника питания стенда 8.

Для обеспечения помехоустойчивости стенда и уменьшения погрешности измерений в программном обеспечении была применена фильтрация сигнала с использованием методов цифровой обработки сигналов, а именно – метода квадратурной демодуляции [18–20] с синхронизацией относительно подаваемого на возбуждение сигнала.

Генератор постоянного тока подключается к обмоткам возбуждения, мостовая схема – к якорю с последовательно включенными обмотками дополнительных полюсов и компенсационной обмотке.

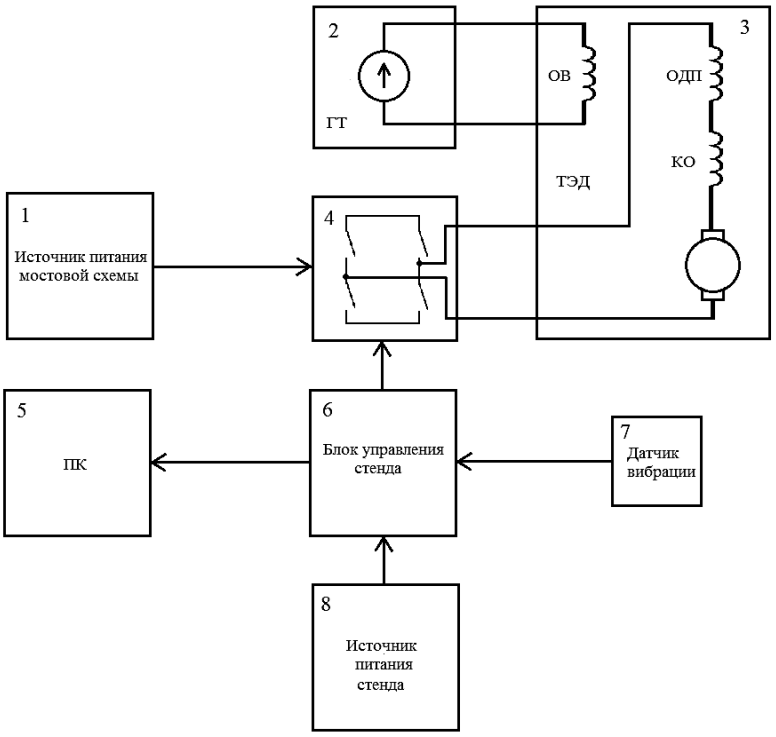


Рис. 3. Функциональная схема стенда для исследования вибрационных характеристик: 1 – источник питания мостовой схемы; 2 – генератор тока (ГТ); 3 – тяговый электродвигатель (ТЭД – тяговый электродвигатель, ОВ – обмотка возбуждения, ОДП – обмотка дополнительных полюсов, КО – компенсационная обмотка); 4 – мостовая схема; 5 – персональный компьютер; 6 – блок управления стенда; 7 – датчик вибрации; 8 – источник питания стенда

Fig. 3. Functional diagram of the test bench for vibration characteristics study: 1 – power source of the bridge circuit; 2 – current generator; 3 – traction motor (ТЭД – traction electric motor, ОВ – excitation winding, ОДП – additional pole winding, КО – compensating winding); 4 – bridge circuit; 5 – personal computer; 6 – test bench control unit; 7 – vibration sensor; 8 – test bench power supply

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения вибрации тягового электродвигателя производились с помощью разработанного стенда при фиксированном токе возбуждения 50 А.

Ниже представлены графики результатов измерений.

Со стороны разводки витки компенсационной обмотки связаны между собой изоляцией, что предопределяет более гладкую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Тем не менее, резонанс в районе 505 Гц будет обусловливать колебания компенсационной обмотки и со стороны разводки.

АЧХ дополнительного полюса (представленного на рис. 4 *d*) имеет набор близлежащих пиков.

АЧХ шины щеткодержателя имеет основной резонанс на частоте 500 Гц, требующий будущего рассмотрения с точки зрения конструкции, т.к. щеткодержатель является узким местом в надежности всего электродвигателя (рис. 5).

АЧХ точек соединения обмоток (1–5) имеют резонансы в районе 500, 600, 700 Гц, что также требует дальнейшего рассмотрения способов их закрепления.

Компенсационная обмотка состоит из набора отдельных витков, вставленных в пазы, которые не связаны между собой с противоположной коллектору стороны. Такая конструкция обусловливает набор резонансов, при этом резонансы с частотой кратной 100 Гц являются чрезвычайно опасными в отношении надежности изоляции обмоток.

С точки зрения вибрации, наилучшей конструкцией обладает обмотка главного полюса, состоящая из набора витков, жестко связанных друг с другом изоляцией. Амплитудно-частотные характеристики данной обмотки представлены на рис. 5 *f,* и указанная обмотка не содержит ярко выраженных резонансов.

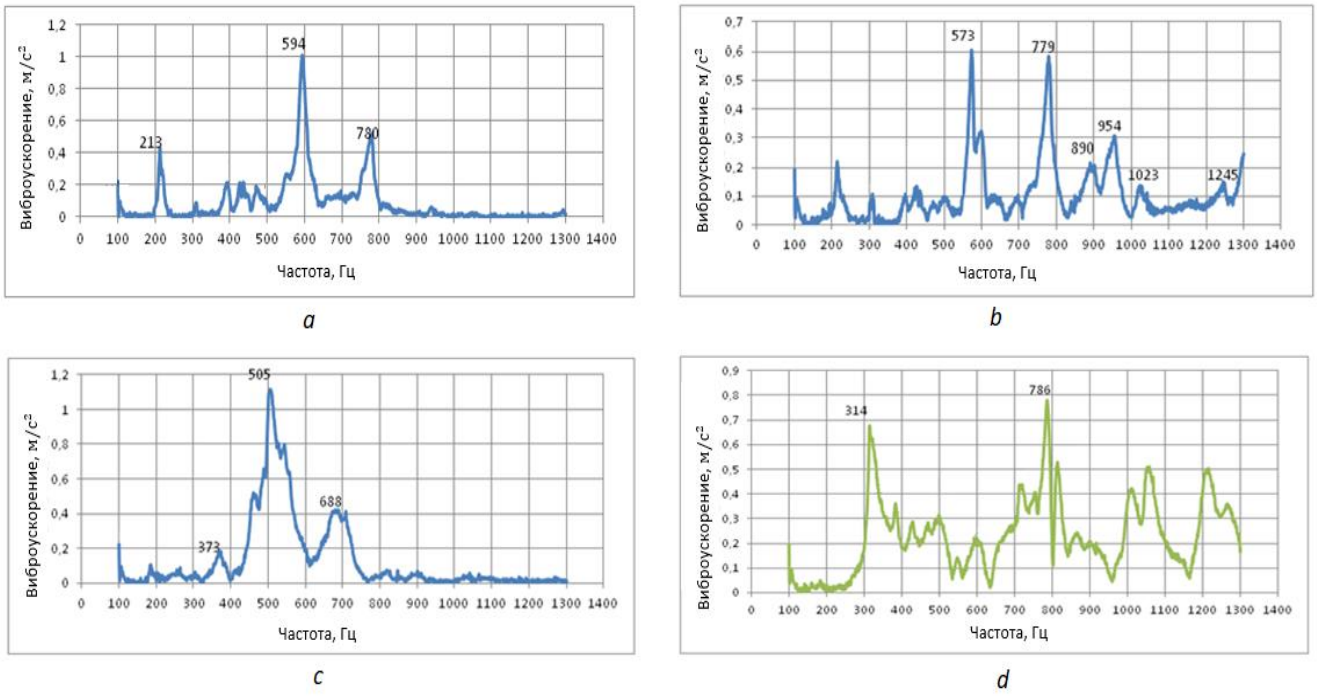


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика обмоток полюсов тягового двигателя: a – четверти от края компенсационной обмотки; b – середины компенсационной обмотки; c – компенсационной обмотки со стороны разводки; d – дополнительного полюса
Fig. 4. Amplitude -frequency response of the traction motor pole windings of: a – a quarter from the edge of the compensating winding; b – middle of the compensating winding; c – compensating winding on the wiring side; d – additional pole

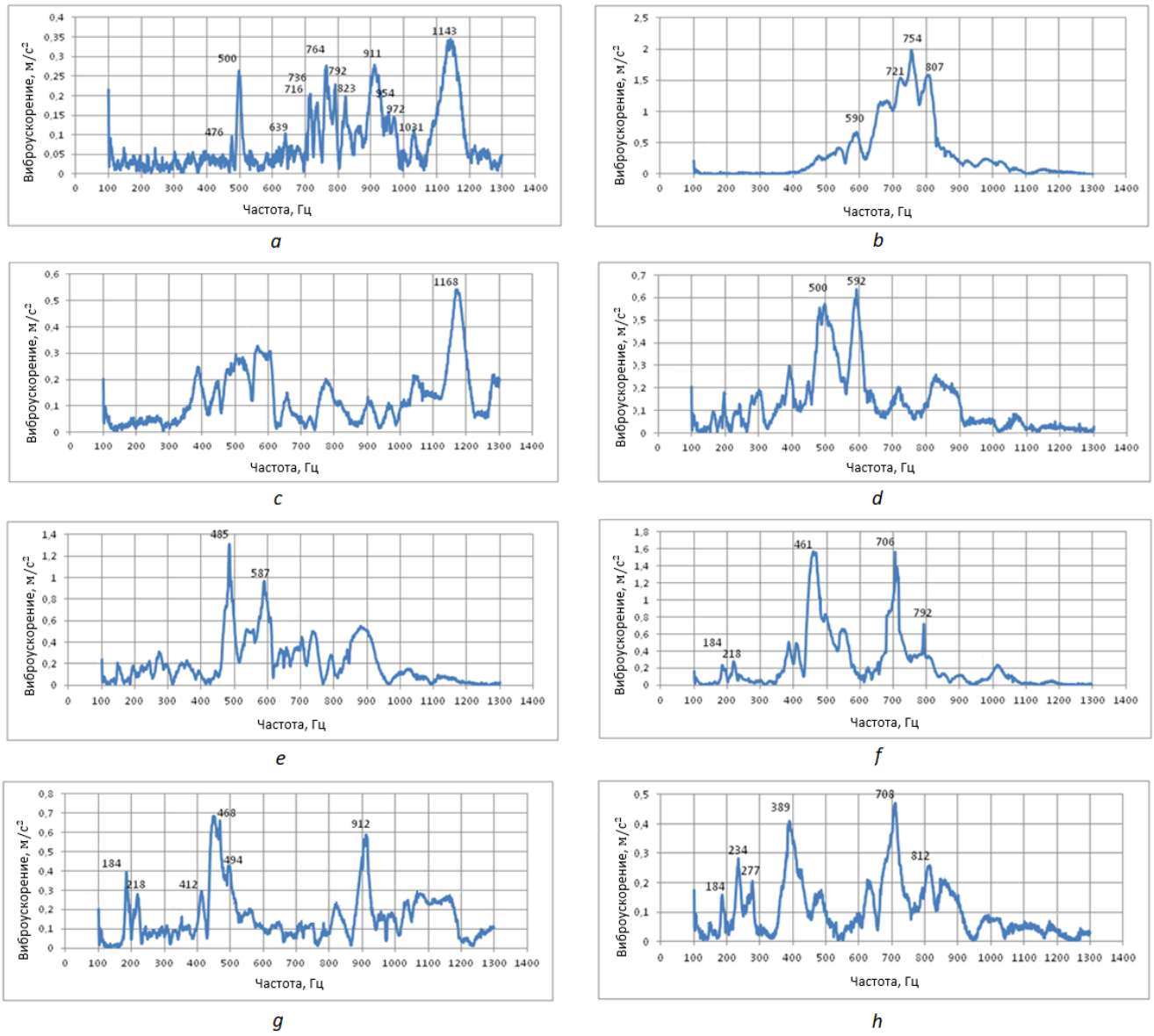


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика обмоток полюсов тягового двигателя: a – шины щеткодержателя; b – главного полюса; c – главного полюса со стороны разводки; d – точки соединения № 1; e – точки соединения № 2; f – точки соединения № 3; g – точки соединения № 4; h – точки соединения № 5

Fig. 5. Amplitude -frequency response of the traction motor pole windings of: a –brush holder buses; b – main pole; c –main pole on the wiring side; d – connection point no. 1; e – connection point no. 2; f – connection point no. 3; g – connection point no. 4; h – connection point no. 5

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы спроектирован и создан стенд для исследования вибрационных характеристик, с помощью которого было проведено измерение амплитудных и частотных характеристик вибраций тягового электродвигателя НБ-514. На основе полученных измерений был проведен анализ результатов измерений, который показал, что на частотах вблизи 100, 200, 400 и 600 Гц имеются электромеханические резонансы с высокой степенью добротности компенсационной обмотки тягового двигателя и точек соединения его обмоток. Также резонанс с частотой 500 Гц имеется в районе крепления щеткодержателя, что может негативно влиять как на комму-

тацию, так и на износ. Полученные данные позволяют актуализировать конструкцию этого тягового двигателя в части электромеханических резонансов и предложить способы уменьшения добротности отдельных точек с точки зрения уменьшения амплитудных колебаний, что должно привести к увеличению надежности как двигателя, так и изоляции его обмоток.

Библиографический список

1. Белая книга ОАО «РЖД» // Железная дорога. История, терминология, новости развития [Электронный ресурс]. URL: http://rly.su/ru/content/белая-книга-оао-ржд (21.05.2019).
2. Русов В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. Пермь: Изд-во Вибро-Центр, 2012. 252 с.
3. Нгулу-А-Ндзели, Тэттэр В.Ю., Шахов В.Г. Опыт диагностирования тяговых двигателей локомотивов // Омский научный вестник. 2019. № 1. С. 67–71. https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-163-67-71
4. Федосов В.А., Августинович А.В. Виброакустическая техника для измерения уровня вибрации на производстве // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. Т. 11. № 1. Р. 1–6. [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vibroakusticheskaya-tehnika-dlya-izmereniya-urovnya-vibratsii-na-proizvodstve (23.06.2019).
5. Коробейников А.Б., Сарваров А.С. Анализ существующих методов диагностирования электродвигателей и перспективы их развития // Электротехнические системы и комплексы. 2015. Т. 26. № 1. Р. 1–6. [Электронный ресурс].URL: https://cyberleninka.ru/article/v/analiz-suschestvuyuschih-metodov-diagnostirovaniya-elektrodvigateley-i-perspektivy-ih-razvitiya (23.06.2019).
6. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. Изд. 2-е, испр. М.: Машиностроение, 2000. 344 с.
7. Минакова Т.Е. Динамика старения изоляции электрических машин // Nauka-rastudent.ru. 2015. № 11. Р. 1–11. [Электронный ресурс]. URL: http://nauka-rastudent.ru/23/3048/ (15.06.2019).
8. Glowacz A., Glowacz A. Diagnosis of stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals // Applied Acoustics. 2017. Vol. 117. Part A. P. 20–27. https://doi.org/ 10.1016/j.apacoust.2016.10.012
9. Glowacz A., Glowacz A. Diagnostics of stator faults of the single-phase induction motor using thermal images, MoASoS and selected classifiers // Measurement. 2016. Vol. 93. P. 86–93. https://doi.org/ 10.1016/j.measurement. 2016.07.008
10. Baranski M., Bedkowski B. Sensorless Vibration Diagnostics of Permanent Magnets Traction Electrical Motors–The Shaft Unbalance Example // Proceedings of the 2015 International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (Phuket, 26–27 July 2015). Phuket: Atlantis Press, 2015. P. 472–474. https://doi.org/10.2991/eame-15.2015.132
11. Barański M., Decner A., Polak A. Selected Diagnostic Methods of Electrical Machines Operating in Industrial Conditions // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2014. Vol. 21. No. 5. P. 2047–2054. https://doi.org/10.1109/tdei.2014.004602
12. Finley W.R., Hodowanec M.M., Holter W.G. An analytical approach to solving motor vibration problems // IEEE. 1999. P. 217–232. https://doi.org/ 10.1109/pcicon.1999.806440
13. Chong Wang, Joseph Lai San-Lun. Vibration analysis of an induction motor // Journal of Sound and Vibration. 1999.Vol. 224. No. 4. P. 733–756. [Электронный ресурс]. URL: https://www. researchgate.net/ publication/258048503_vibration_analysis_of_an_electric_motor (23.06.2019).
14. Vidhya B., Srinivas K.N. Vibration analysis including stator, rotor, housing and dynamic response analysis of Flux Reversal Generator // Journal of Electrical Systems and Information Technology. 2018. Vol. 5. No. 2. P. 144–157. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sciencedirect.com/sdfe/reader/pii/S2314717218300229/pdf (23.06.2019).
15. Пат. № 2436081, Российская Федерация, МПК G01N 29/11. Способ акустической диагностики изоляции обмоток асинхронного двигателя / Н.Т. Герцен, Г.В. Суханкин, Н.П. Воробьев; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. Заявл. 15.07.2010; опубл. 10.12.2011. Бюл. № 34.
16. Пат. № 121939, Российская Федерация, МПК G01R 31/12. Устройство для контроля изоляции электродвигателя / О.В. Крюков; заявитель и патентообладатель ОАО «Гипрогазцентр». Заявл. 18.07.2012; опубл. 10.11.2012. Бюл. № 31.
17. Пат. № 2246166, Российская Федерация, МПК H02K15/00, G01R 31/34. Способ динамического контроля внутренних параметров систем электродвигателя / Д.Р. Смит; заявитель и патентообладатель Шелл Интернешнл Рисерч Маатсхаппий Б.В. № 2001128662/09. Заявл. 23.03.2000; опубл. 10.02.2005. Бюл. № 4.
18. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов: практический подход / пер. с англ. М.: Вильямс, 2004. 992 с.
19. Уидроу Б., Стирнз С.Д. Адаптивная обработка сигналов / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
20. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / пер. с англ. М.: Мир, 1990. 265 с.

References

1. Belaya kniga OAO “RZhD. *Zheleznaya doroga. Istoriya, terminologiya, novostirazvitiya* = White book of Russian Railways. Railway. History, terminology, development news. Available from: http://rly.su/ru/content/belaya-kniga-oao-rzhd [Accessed 21st May 2018]. (In Russ.)
2. Rusov VA. Diagnosis of rotating equipment defects by vibration signals. Perm': Vibro-Centr; 2012. 252 p. (In Russ.)
3. Ngulu-A-Ndzeli, Tjettjer VJu, Shahov VG. Diagnosis experience of traction engines of locomotives. *Omskij nauchnyj vestnik* = The Journal Omsk Scientific Bulletin. 2019;1:67–71. (In Russ.) https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-163-67-71
4. Fedosov VA, Avgustinovich AV. Vibroacoustic technique for measuring the vibration level at the enterprises. *Elektrotekhnicheskie i informacionnye kompleksy i sistemy* = Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2015;11(1):1–6. Available from:https://cyberleninka.ru/article/n/vibroakusticheskaya-tehnika-dlya-izmereniya-urovnya-vibratsii-na-proizvodstve [Accessed 23nd June 2018]. (In Russ.)
5. Korobejnikov AB, Sarvarov AS. Analysis of the existing methods for diagnostics of electric motors and perspectives of their development. *Elektrotekhnicheskie i informacionnye kompleksy i sistemy* = Electrical and Data Processing Facilities and Systems. 2015;26(1):1–6.Available from:https://cyberleninka.ru/article/v/analiz-suschestvuyuschih-metodov-diagnostirovaniya-elektrodvigateley-i-perspektivy-ih-razvitiya [Accessed 23nd June 2018]. (In Russ.)
6. Gol'din AS. *Vibration of rotary machines*. Moscow: Mashinostroenie; 2000. 344 p. (In Russ.)
7. Minakova TE. Dynamics of aging of isolation of electrical machines. Nauka-rastudent.ru. 2015;11:1–11. Available from: http://nauka-rastudent.ru/23/3048/ [Accessed 15th June 2019]. (In Russ.)
8. Glowacz A, Glowacz A. Diagnosis of stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals. Applied Acoustics. 2017;117(A):20–27. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.10.012
9. Glowacz A, Glowacz A. Diagnostics of stator faults of the single-phase induction motor using thermal images, MoASoS and selected classifiers. Measurement. 2016;93:86–93. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.008
10. Baranski M, Bedkowski B. Sensorless Vibration Diagnostics of Permanent Magnets Traction Electrical Motors–The Shaft Unbalance Example. In: Proceedings of the 2015 International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering. 26–27 July 2015, Phuket. Phuket: Atlantis Press; 2015, p. 472–474. https://doi.org/10.2991/eame-15.2015.132
11. Barański M, Decner A, Polak A. Selected Diagnostic Methods of Electrical Machines Operating in Industrial Conditions. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2014;21(5):2047–2054. https://doi.org/10.1109/tdei.2014.004602
12. Finley WR, Hodowanec MM, Holter WG. An analytical approach to solving motor vibration problems. IEEE. 1999:217–232. https://doi.org/10.1109/pcicon.1999.806440
13. Chong Wang, Joseph Lai San-Lun. Vibration analysis of an induction motor. Journal of Sound and Vibration. 1999;224(4):733–756. Available from: https://www.researchgate.net/publication/258048503_vibration_analysis_of_an_electric_motor (23.06.2019). [Accessed 23st June 2019].
14. Vidhya B, Srinivas KN. Vibration analysis including stator, rotor, housing and dynamic response analysis of Flux Reversal Generator. Journal of Electrical Systems and Information Technology. 2018;5(2):144–157. Available from: https://www.sciencedirect.com/sdfe/reader/pii/S2314717218300229/pdf [Accessed 23nd June 2019].
15. Herzen NT, Suhankin GV, Vorob'ev NP. *Method for acoustic diagnostics of asynchronous motor winding insulation*. Patent RF, no. 2436081; 2011. (In Russ.)
16. Krjukov OV. *A device for monitoring electric motor insulation*. Patent RF, no.121939; 2012.(In Russ.)
17. Smit DR. Dynamic control method of internal parameters of electric motor systems. Patent RF, no. 2246166; 2005.
18. Ajficher Je, Dzhervis B. Digital signal processing: a practical approach, 2004, 992 p. (Russ. ed.: *Cifrovaja obrabotka signalov: prakticheskij podhod.* Moscow, Williams, 2004, 992 p.)
19. Uidrou B, Stirnz SD. Adaptive signal processing, 1990, 265 p. (Russ. ed.: *Adaptivnaja obrabotka signalov.* Moscow, Radio and communication, 1989, 440 p.)
20. Marpl Jr. SL. Digital spectral analysis and its applications, 1990, 265 p. (Russ. ed.: *Cifrovoj spektral'nyj analiz i ego prilozhenija*, Moscow, Mir, 1990, 265 p.)

Критерии авторства

Портной А.Ю., Мищенков М.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Portnoy A.Yu., Mishchenkov M.V. declare equal participation in obtaining and for-malization 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

Портной Александр Юрьевич,
доктор физико-математических наук,
доцент кафедры физики, механики
и приборостроения,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
✉ e-mail: portnoyalex@yandex.ru

Мищенков Максим Вальдемарович,
аспирант,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
e-mail: reydersp@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr Yu. Portnoi,
Dr. Sci. (Physics and Mathematics),
Associate Professor of the Department of Physics,
Mechanics and Instrumentation,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: portnoyalex@yandex.ru

Maksim V. Mishchenkov,
Postgraduate Student,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: reydersp@mail.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 534.1:539.3
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1071-1082

Программный комплекс для оценки влияния расстройки параметров рабочих колес турбомашин на их долговечность

© И.Н. Рыжиков*, Б. Байроу**
**Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*
***Бранденбургский технический университет, г. Котбус, Германия*

Резюме: Цель представленных в работе исследований – разработать программный комплекс, позволяющий проводить анализ влияния расстройки параметров колебаний рабочих колес турбомашин на их частоты колебаний и долговечность. Описанный в статье программный комплекс позволяет проводить анализ частот собственных и вынужденных колебаний, а также долговечности рабочих колес газотурбинных двигателей и других турбомашин с расстройкой параметров. В статье приведены основные положения метода конечных элементов, используемые при анализе колебаний и долговечности элементов роторов газотурбинных двигателей (представлен алгоритм расчета долговечности их рабочих колес). Программный комплекс протестирован на тестовых моделях. Приведенные результаты расчетов тестовой модели в сравнении с результатами, полученными в программном комплексе ANSYS, демонстрируют достаточно малую погрешность, что позволяет применять разработанный программный комплекс для решения задач анализа влияния расстройки параметров колебаний рабочих колес турбомашин на их колебания и долговечность. Помимо тестовых моделей, проведены расчеты долговечности реального рабочего колеса с интегрированными лопатками фирмы Rolls-Royce. Представлены результаты анализа влияния на долговечность лопатки – расстройки параметров, вводимой путем изменения жесткости материала разных участков лопаток. При этом были исследованы несколько вариантов лопаток с разными значениями модуля Юнга для различных участков лопатки и их сочетаний. Проведены расчеты долговечности лопатки с использованием разных гипотез накопления повреждений (Серенсен, Кортен – Долан, Палмгрен – Майнер). Результаты расчетов позволяют сделать вывод о том, что даже малая расстройка может оказывать заметное влияние на долговечность рабочего колеса.

Ключевые слова: рабочие лопатки ротора, свободные колебания, расстройка параметров, программный комплекс, проектирование, метод конечных элементов

Информация о статье: Дата поступления 17 октября 2019 г.; дата принятия к печати 24 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2019 г.

Для цитирования: Рыжиков И.Н., Байроу Б. Программный комплекс для оценки влияния расстройки параметров рабочих колес турбомашин на их долговечность. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 6. С. 1071–1082. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1071-1082

Software package to estimate turbomachine impeller mistuning effect on blade durability

Igor N. Ryzhikov, Bernd Beirow
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
Brandenburg University of Technology, Cottbus, Germany

Abstract: The purpose of the present research is to develop a software package that allows to analyze the effect of turbomachine impellers oscillation detuning on their vibration frequencies and durability. The software package described in the article allows to analyze the frequencies of natural and forced oscillations, as well as the durability of gas turbine engine and other turbomachine impellers with parameter mistuning. The article presents the main provisions of the finite element method used in the analysis of oscillations and durability of gas turbine engine rotor elements (the algorithm for calculating their impeller durability is given). The software package is tested on test models. The comparison of test model calculation results and the results obtained in the ANSYS software package demonstrate a sufficiently small error that allows to use the developed software package to solve the analysis problems of the effect of turbomachine impellers oscillation parameter detuning on their vibrations and durability. In addition to the test models, the durability of a real impeller with Rolls-Royce integrated blades is calculated. The article shows the analysis results of the effect of parameter detuning introduced by material stiffness variation in different parts of the blades on blade durability. At the same time,

the study is given to the several variants of blades with different values of Young's modulus for different parts of the blade and their combinations. Blade durability is calculated using different hypotheses of damage accumulation (Serensen, Corten – Dolan, Palmgren – Miner). The calculation results have led to a conclusion that even a small detuning can have a noticeable impact on impeller durability.

Keywords: rotor blades, free oscillations, mistuning, program package, design, finite element method

Information about the article*:* Received October 17, 2019; accepted for publication November 24, 2019; available online December 28, 2019.

For citation: Ryzhikov IN, Beirow B. Software package to estimate turbomachine impeller mistuning effect on blade durability. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1071–1082. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1071-1082

1. ВВЕДЕНИЕ

В ближайшее время будут проведены испытания самолета МС-21 с двигателем ПД-14, сертифицированным Федеральным Агентством воздушного транспорта (Росавиацией) в октябре 2018 г. Реализация проекта создания базового двигателя ПД-14, разработанного АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», для оснащения им пассажирского самолета МС-21-300 является успешным примером в области российского двигателестроения. Данный проект был бы невозможен без применения современных программных средств имитационного моделирования, позволяющих во многом заменить натурный эксперимент численным, существенно сократив затраты.

Рабочие колеса, являясь основными элементами конструкции роторов газотурбинных двигателей (ГТД), работают в сложных условиях (большие скорости вращения, высокая температура, переменные давления, сложные аэродинамические нагрузки и т.д.). Можно утверждать, что долговечность ГТД определяется долговечностью наиболее нагруженных элементов конструкции ее ротора – рабочих колес. Один из множества факторов, влияющих на долговечность, – это расстройка параметров, т.е. малые отличия в геометрии, массе, свойствах материала отдельных секторов рабочего колеса. Расстройка всегда присутствует в реальной конструкции и является результатом погрешностей, возникших при ее изготовлении и сборке. Некоторые авторы в своих исследованиях показали, что расстройка может оказывать существенное влияние на уровень динамических напряжений в лопатках ротора, что негативно сказывается на долговечности конструкции [1–15].

В этой связи разработка высокоточных математических моделей на основе метода конечных элементов (МКЭ), эффективных алгоритмов и программного комплекса для исследования колебаний и долговечности рабочих колес ГТД является актуальной задачей. Известен ряд работ, посвященных решению проблем конечно-элементного моделирования рабочих колес турбомашин [1–7].

2. УРАВНЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ И ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧИХ КОЛЕС РОТОРА

Уравнение собственных колебаний рабочего колеса, являющегося циклически симметричной системой, содержащей N секторов, можно представить в виде:

$$[K]\{\bar{\delta}\} = \omega^2[M]\{\delta\},$$

где $[K]$ – матрица жесткости, $\{\bar{\delta}\}$ – вектор перемещений всей конструкции, ω – круговая частота системы, $[M]$ – матрица масс, $\{\delta\}$ – вектор перемещений сектора.

Нагрузки, действующие при колебаниях на рабочее колесо, представляются как сумма конечного числа гармоник ряда Фурье. На каждый сектор колеса действует сила, отличающаяся на фиксированную величину от силы, действующей на соседний сектор. Сила $P_{k,j}$, действующая в направлении k-го возможного перемещения на j-й сектор конечно-элементной модели рабочего колеса в момент времени t, пред-

ставляется в виде ряда Фурье:

$$P_{k,j}(t) = \sum_{p=1}^{N} A_{pk}(t) e^{i(J-1)\mu},$$

где $A_{pk}(t)$ – текущее значение p-й рассматриваемой гармоники Фурье от сил, соответствующих константе μ волнового распространения; N – число подструктур; e – основание натурального логарифма.

Для каждой лопатки колеса все гармоники этого ряда претерпевает изменение. В итоге уравнение вынужденных колебаний j-го сектора для конкретной гармоники Фурье имеет следующий вид:

$$M_P \ddot{\delta}_P^J(t) + C_P \dot{\delta}_P^J(t) + K_P \delta_P^J(t) = A_P(t),$$

где M_p, C_p, K_p – соответственно, матрицы масс, демпфирования и жесткости сектора рабочего колеса для p-й гармоники; $\bar{\delta}^J_p$ – вектор перемещений сектора. Вектор $A_P(t)$ включает все значения $A_{PK}(t)$.

3. ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОЧИХ КОЛЕС ТУРБОМАШИН

Из множества классификационных методов классификации напряжений для анализа долговечности чаще всего используются методы LCC (англ. level crossing counting «метод пересечений») и RFCC (англ. rain-flow-cycle counting «метод дождя» [2]). Выбор того или иного метода не особенно существенен. Согласно этим методам, диаграмма «напряжения – время» раскладывается на отдельные величины (классы). Эти классы напряжений используются впоследствии при применении той или иной гипотезы накопления повреждений. Различие в методах LCC и RFCC в том, что по методу LCC оценивается только один параметр – амплитуда напряжений, а по методу RFCC оцениваются амплитуды и средние значения напряжений в каждом классе. В результате использования одного из классификационных методов получают различные группы статических и динамических напряжений с различной повреждаемостью.

Что касается выбора гипотезы накопления повреждений, в соответствии с которой делается прогноз долговечности, то необходимо отметить, что этот выбор зависит от свойств материала конструкции. При этом линейные гипотезы накопления повреждений применяются наиболее часто. Однако, в ряде практических случаев наблюдается нелинейная зависимость количества повреждений от числа циклов нагружений. Из множества гипотез рассмотрены гипотезы Кортен – Долан, Палмгрен – Майнер, Хайбах и Серенсена [3].

4. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ РАССТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ РАБОЧИХ КОЛЕС АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

С использованием вышеописанных положений был разработан программный комплекс для анализа долговечности рабочих колес турбомашин с расстройкой параметров (рис. 1).

Программный комплекс написан на языке программирования пакета MATLAB, который используется в настоящее время для решения инженерных и научных задач. Областями применения разработанного программного комплекса являются: проектирование, изготовление (сборка) авиационных ГТД и их эксплуатация.

Минимальные требования к системному программному обеспечению и к компьютеру при использовании программного комплекса определяются минимальными требованиями пакета MATLAB. Это 32- или 64-разрядная операционная система Microsoft Windows, процессор Pentium, оперативная память – не менее 1 Гб, монитор – минимум 256 цветов, графический адаптер (минимум 16 битов), жесткий диск – не менее 5 Гб.

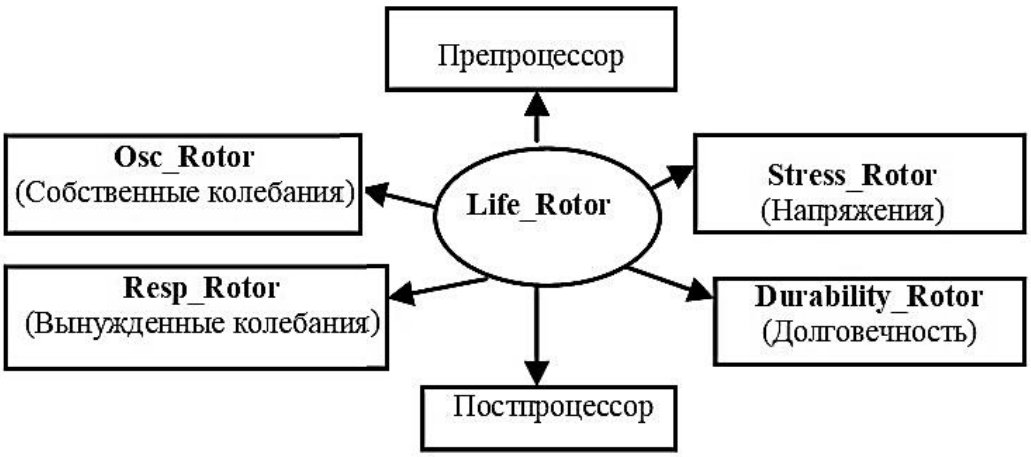


Рис. 1. Блок-схема программного комплекса
Fig. 1. Block diagram of the software package

В состав программного комплекса входит ряд модулей, имеющих различное назначение. Это такие модули, как:

– препроцессор – модуль для ввода исходных данных и построения конечно-элементной сетки;

– Osc_Rotor – модуль расчета свободных колебаний конструкции;

– Resp_Rotor – модуль расчета вынужденных колебаний конструкции;

– Stress_Rotor – модуль расчета динамических напряжений в конструкции;

– Duarability_Rotor – модуль расчета долговечности;

– постпроцессор – модуль вывода результатов в виде изолиний, графиков, диаграмм либо таблиц.

На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма расчета долговечности рабочих колес ГТД.

На рис. 3 представлено одно из окон интерфейса модуля Osc_Rotor.

5. ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Тестирование вышеописанного алгоритма проводилось на двух моделях: модели отдельного диска и модели рабочего колеса, в состав которого входило 24 лопатки.

Модель диска имела следующие параметры:

1. Геометрия: внутренний радиус – 0,1 м; внешний радиус – 0,2 м; толщина диска – 0,001 м.

2. Характеристики материала: модуль упругости E – 215 ГПа; плотность – 8200 кг/м^3; коэффициент Пуассона – 0,29.

3. Условие закрепления диска – по внутреннему контуру.

На рис. 4 представлены формы колебаний, различающиеся числом узловых диаметров n и узловых окружностей m. Результаты расчета показали хорошую точность при сравнении с результатами эксперимента [3] и данными, полученными с использованием программного комплекса ANSYS (табл. 1).

Модель рабочего колеса (рис. 5) содержала 24 лопатки и имела следующие параметры.

1. Геометрия: внутренний радиус – 0,014 м; внешний радиус – 0,06 м; толщина диска и лопаток – 0,002 м; длина лопаток – 0,036 м; ширина лопаток – 0,012м.

2. Характеристики материала: модуль упругости E – 210 ГПа; плотность – 7850 кг/м^3; коэффициент Пуассона – 0,3.

Формы рассчитанных свободных колебаний модели рабочего колеса представлены на рис. 6. Результаты расчета частот свободных колебаний в сравнении с экспериментом [3] и расчетами в программном комплексе ANSYS приведены в табл. 2.

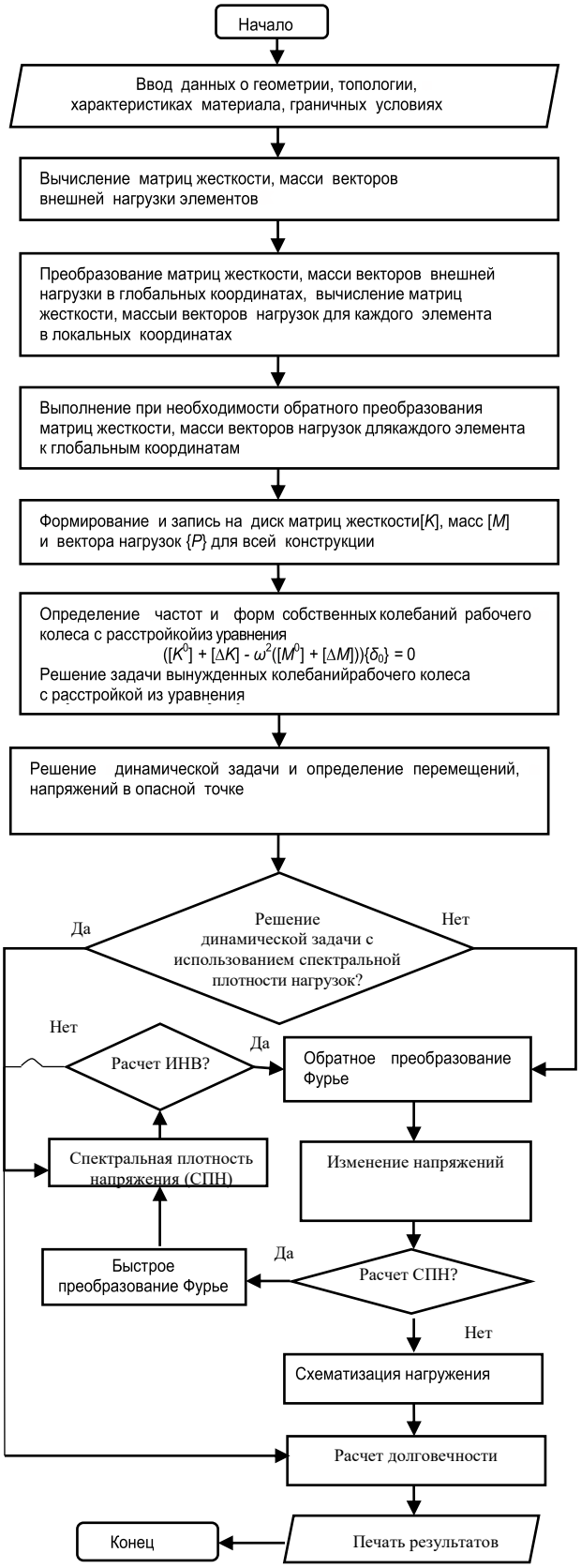


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета долговечности рабочих колес газотурбинного двигателя
Fig. 2. Block diagram of the calculation algorithm of gas turbine engine impeller durability

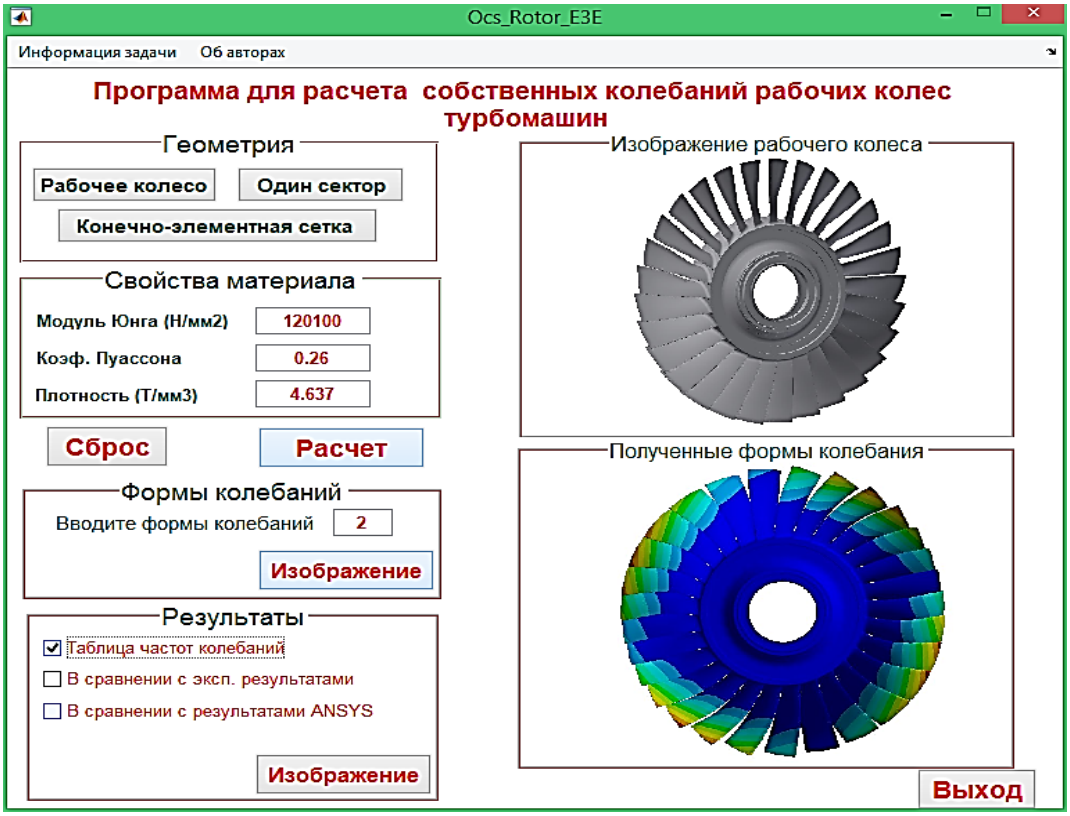


Рис. 3. Окно интерфейса модуля Osc_Rotor
Fig. 3. Interface window of the Osc_Rotor module

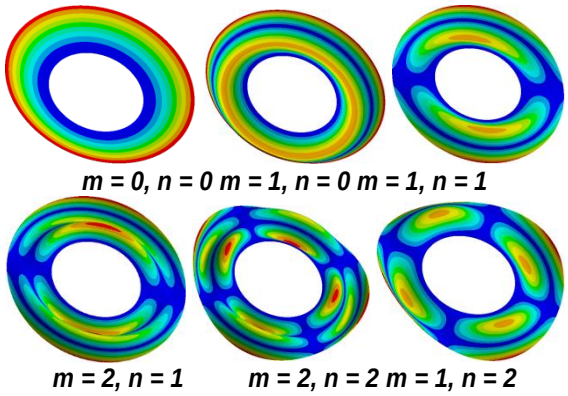


Рис. 4. Формы свободных колебаний тестового диска
Fig. 4. Free oscillation forms of a test disk

Таблица 1

Частоты свободных колебаний тестового диска, Гц

Table 1

Free oscillation frequencies of a test disk, Hz

m	*n* = 0			*n* = 1		
	МКЭ	ANSYS	Эксп.	МКЭ	ANSYS	Эксп.
0	79,04	78,74	79,2	80,81	80,38	81,2
1	517,2	522,58	515,8	527,3	532,09	526,3
2	1483	1543,9	–	1494	1543,9	–

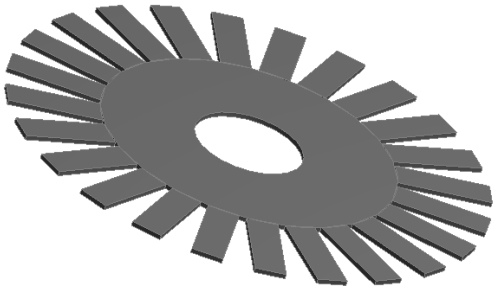


Fig. 5. Модель рабочего колеса
Fig. 5. Impeller model

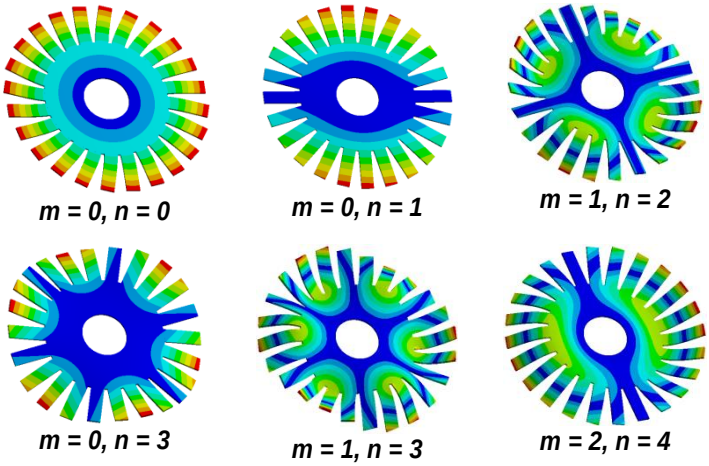


Fig. 6. Формы свободных колебаний модели рабочего колеса
Fig. 6. Free oscillation forms of the impeller model

Очевидно из табл. 2, что полученные результаты хорошо совпадают с расчетами в программе ANSYS, а также с данными эксперимента, что говорит о трудоспособности разработанных алгоритмов и программного комплекса.

6. АНАЛИЗ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РЕАЛЬНОГО РАБОЧЕГО КОЛЕСА

После тестирования программы был проведен расчет долговечности рабочего колеса фирмы Rolls-Royce, включающего 29 лопаток. Колесо, выполненное из титана, имело следующие характеристики материала: модуль упругости E – 120100 Н/мм^2; плотность – 4637 кг/м^3; коэффициент Пуассона – 0,26. Общий вид рабочего колеса представлен на рис. 7. В представленных исследованиях был проведен анализ влияния на долговечность расстройки, вводимой в систему путем изменения жесткости материала лопаток. Было исследовано два варианта изменения жесткости рабочих лопаток колеса. В первом случае значение модуля Юнга материала лопаток изменялось на величину не более чем на 10%. Модуль Юнга для n–й лопатки (E_n) определялся как

$$E_n = E_0(1 + \Delta f_n^E),$$

где E_0 – номинальное значение модуля Юнга; Δf_n^E – изменение значения модуля Юнга для n-й лопатки. Собственные частоты лопаток при этом изменились пропорционально изменению модуля Юнга и формы колебаний остались неизменными.

Во втором случае каждая лопатка разделялась на 4 части с разными значениями модуля упругости (рис. 8). Расстройка вводилась путем изменения значений модуля упругости (не более 10%) для разных участков лопатки (частей): $E_{n,1}$ – для нижней левой и верхней правой; $E_{n,2}$ – для нижней правой и верхней левой.

Таблица 2

Частоты свободных колебаний модели рабочего колеса, Гц

Table 2

Free oscillation frequencies of the impeller model, Hz

n	*m* = 0			*m* = 1		
	ANSYS	МКЭ	Эксп.	ANSYS	МКЭ	Эксп.
0	263,4	260,1	265	1470	1461	1386
1	280	251,1	210	1515,2	1522	1361
2	314,1	320,7	340	1730,7	1737	1723
3	485	492	501	2184	2147	2109
4	651,22	669	681	2785	2714	2714
5	778,1	808	803	3323,3	3354	3452
6	858	912	922	4030	4002	4102
7	980,5	987	938	4574,9	4613	4738
8	1041	1042	961	5048,1	5155	5112
9	1054,5	1080	1008	5430	5605	5513
10	1089	1105	1027	5742	5947	5983
11	1106,5	1119	1030	6140,7	6166	6212
12	1118,6	1124	1032	6354,9	6243	6221

Для расчета долговечности использовалась схематизация напряжений, возникающих в материале при колебаниях, по «методу дождя» [4, 6]. Кроме этого, проведено сравнение результатов, полученных при использовании различных гипотез накопления повреждений (Серенсен, Кортен – Долан, Палмгрен – Майнер).

В табл. 3 представлены результаты расчета долговечности рабочего колеса с расстройкой и без расстройки при использовании различных гипотез накопления усталостных повреждений.

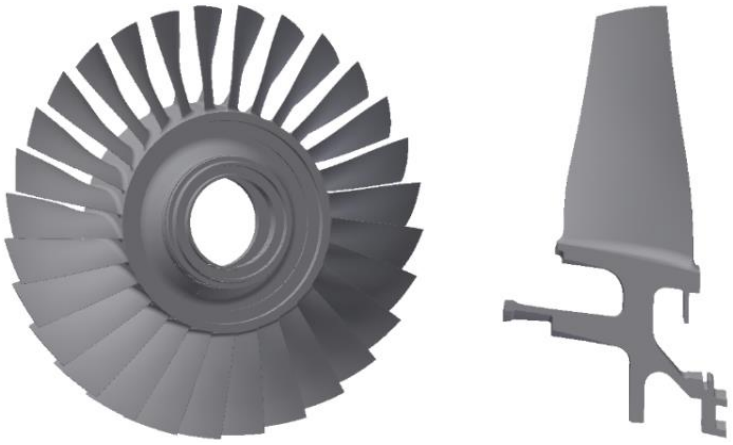


Fig. 7. Рабочее колесо фирмы Rolls-Royce
Fig. 7. Rolls-Royce impeller

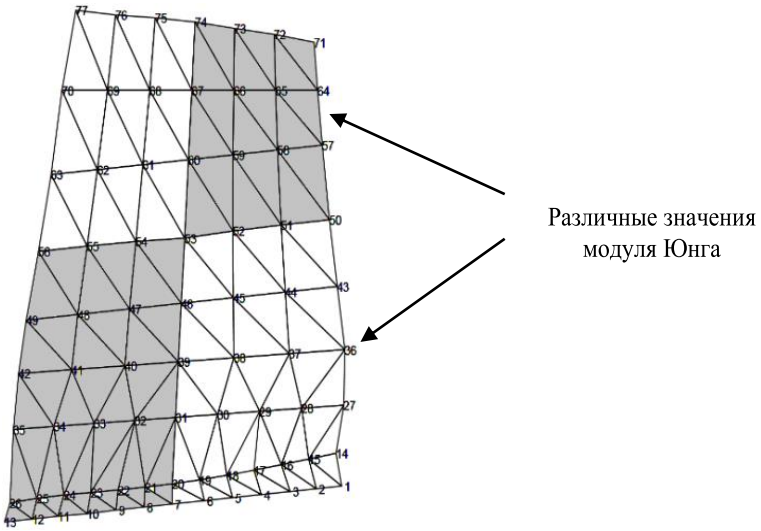


Рис. 8. Изменение модуля Юнга участков лопатки
Fig. 8. Young's modulus variation of blade parts

Таблица 3

Сравнение результатов расчета на долговечность рабочего колеса с расстройкой и без расстройки

Table 3

Comparison of durability calculation results of an impeller with and without mistuning

Линейные гипотезы накопления усталостных повреждений	Долговечность (цикл)			
	Вариант 1		Вариант 2	
	Настроенных систем	Расстроенных систем	Настроенных систем	Расстроенных систем
Палмгрен – Майнер	1,2860E+5	1,1890E+5	1,1675E+5	1,0816E+5
Хайбах	1,1390E+5	1,0087E+5	0,9873E+5	0,8909E+5
Кортен – Долан	1,0594E+5	0,8907E+5	0,8985E+5	0,7908E+5
Серенсен	0,8908E+5	0,7896E+5	0,7974E+5	0,6871E+5

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный программный комплекс для исследования влияния расстройки параметров на долговечность рабочих колес авиационных ГТД был протестирован на тестовых моделях. С помощью данного комплекса проведено исследование влияния на долговечность расстройки, введенной в систему путем изменения жесткости материала лопаток. Результаты расчетов позволяют сделать вывод о том, что даже малая расстройка может оказывать заметное влияние на долговечность рабочего колеса.

Данный комплекс может использоваться как отдельный модуль в системах автоматизированного проектирования таких объектов как рабочие колеса ротора ГТД. Также его использование возможно на этапе изготовления (сборки) роторов и при диагностическом контроле на этапе эксплуатации авиационных ГТД.

Библиографический список

1. Репецкий О.В., Рыжиков И.Н., Шмидт Р. Исследования влияния различных видов расстройки параметров на колебания и долговечность рабочих колес турбомашин // Вестник Байкальского союза стипендиатов DAAD (Байкальский государственный университет экономики и права). 2010. № 1. С. 20–31.

2. Репецкий О.В., Рыжиков И.Н., Нгуен Тьен Кует. Компьютерный анализ ресурсных характеристик рабочих колес газотурбинных двигателей с расстройкой параметров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2018. № 53. С. 52–62. https://doi.org/10.15593/2224-9982/2018.53.05

3. Рыжиков И.Н. К оценке долговечности роторов газотурбинных двигателей // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. VI Всерос. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 26–27 февраля 2016 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. С. 288–294.

4. Репецкий О.В., Ван Винь Нгуен, Байроу Б. Исследование методов внесения специальной расстройки в лопатках энергетических и транспортных турбомашин для снижения динамических напряжений и увеличения ресурса // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 23–25 мая 2019 г.). Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2019. С. 57–64.

5. Репецкий О.В., Нгуен В.В. Численный анализ прочностных характеристик машиностроительных конструкций с расстройкой параметров // Вестник НГИЭИ. 2019. № 7. С. 27–38.

6. Репецкий О.В., До Мань Тунг. Исследование характеристик колебаний рабочих колес турбомашин с расстройкой параметров на основе моделирования уменьшенного порядка методом конечных элементов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. 2014. № 1. С. 60–66.

7. Репецкий О.В., Байроу Б. Применение анализа чувствительности для исследования систем с расстройкой параметров // Байкальский вестник ДААД. 2016. № 1. Р. 86–98.

8. Хайманн Б., Герт В., Попп К., Репецкий О.В. Мехатроника: компоненты, методы, примеры / пер. с нем. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения Российской академии наук, 2010. 601 с.

9. Beirow B., Figaschewsky F., Kühhorn A., Bornhorn A. Modal Analyses of an Axial Turbine Blisk with Intentional Mistuning // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2018. Vol. 140. Lssue 1. P. 012503. https://doi.org/10.1115/1.4037588

10. Figaschewsky F., Kühhorn A. Analysis of Mistuned Blade Vibrations Based on Normally Distributed Blade Individual Natural Frequencies // ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition (Montreal, June 15–19, 2015). Montreal, 2015. Vol. 7B. P. GT2015-43121. https://doi.org/10.1115/GT2015-43121

11. Beirow B., Giersch T., Kuehhorn A., Nipkau J. Optimization-Aided Forced Response Analysis of a Mistuned Compressor Blisk // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2015. Vol. 137. Issue 1. P. 012504-1-012504-10.
https://doi.org/10.1115/1.4028095

12. Beirow B., Kuehhorn A., Figashevsky F., Bornhorn A., Repetckii O. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2019. Vol. 141. P. 11008–11008-8.
https://doi.org/https://doi.org/10.1115/1.4040715

13. Beirow B., Kühhorn A., Nipkau J. On the influence of Strain Gauge Instrumentation on Blade Vibrations of Integral Blisk Compressor Rotors Applying a Discrete Model // Conference ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air (Orlando, 8–12 June 2009). Orlando, 2009. Vol. 6. P. 245–253. https://doi.org/10.1115/GT2009-59207

14. Figashevsky F., Kuehhorn A., Beirow B., Giersch T., Nipkau J., Meinl F. Simplified Estimation of Aerodynamic Damping For Bladed Rotors. Part 2: Experimental Validation During Operation // ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (Seoul, 13–17 June 2016). Seoul, 2016. Vol. 7. P. GT2016-56458. https://doi.org/10.1115/GT2016-56458

15. Bladh R., Castanier M.P., Pierre C. Component-Mode-Based Reduced order modeling techniques for Mistuned bladed Disks. Part I: Theoretical Models // Journal of Engineering for Gas turbines and Power. 2001. Vol. 123. No. 8. P. 89–99. https://doi.org/10.1115/1.1338947

16. Vyas N.S., Rao J.S. Fatigue Life Estimation Procedure for a Turbine Blade Under Transient Loads // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 1994. Vol. 116. Issue 1. P. 198–206. https://doi.org/10.1115/1.2906792

17. Ewins D.J., Han Z.S. Resonant vibration levels of a mistuned bladed disk // Journal of Vibration and Acoustics. 1984. Vol. 106. Issue 2. P. 211–217. https://doi.org/10.1115/1.3269171

18. Gross J., Krack M., Schoenenborn H. Analysis of the Effect of Multirow and Multipassage Aerodynamic Interaction on the Forced Response Variation in a Compressor Configuration. Part II: Effects of Additional Structural Mistuning // Journal of Turbomachinery. 2018. Vol. 140. Issue 5. P. 051005. https://doi.org/10.1115/1.4038869

19. Repetckii O., Ryzhikov I., Nguyen Tien Quyet. Dynamics analysis in the design of turbomachinery using sensitivity coefficients // Journal of Physics: IOP Conf. Series. 2018. Vol. 944. P. 012096. [Электронный ресурс]. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/944/1/012096/pdf (18.02.2019). https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012096

20. Repetckii O., Ryzhikov I., Nguyen Tien Quyet. Investigation of mistuning impact on vibration of rotor bladed disks // Journal of Physics: IOP Conf. Series. 2018. Vol. 944. P. 012097. [Электронный ресурс]. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/944/1/012097/pdf (18.02.2019). https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012097

References

1. Repetskiy OV, Ryzhikov IN, Schmidt R. Studies of the influence of various types of parameter mistuning on turbomachine impeller vibrations and fatigue life. Vestnik Bajkal'skogo soyuza stipendiatov DAAD (Bajkal'skij gosudarstvennyj universitet ekonomiki i prava) = Baikal Letter DAAD (Baikal State University of Economics and Law). 2010;1:20–31. (In Russ.)

2. Repetskiy OV, Ryzhikov IN, Nguyen Tien Quyet. The computer analysis of resource characteristics of gas turbine engines bladed disks with mistuning. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika* = PNRPU Aerospace Engineering Bulletin. 2018;53:52–62. (In Russ.) https://doi.org/10.15593/2224-9982/2018.53.05

3. Ryzhikov IN. To evaluation of gas turbine engine rotor durability. *Aviamashinostroenie i transport Sibiri: sbornik statej VI Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii* = Aircraft engineering and transport of Siberia, collected articles of VI All-Russian Scientific and Practical Conference. 26–27 February 2016, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk national research technical university; 2016, p. 288–294. (In Russ.)

4. Repetskiy OV, Nguyen VV, Bairow B. Studying methods introducing special mistuning in the blades of energy and transport turbomachines to reduce dynamic stresses and improve durability. *Klimat, ekologiya, sel'skoe hozyajstvo Evrazii: materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* = Climate, Ecology, Agriculture of Eurasia. Proceedings of VIII international scientific and practical conference. 23–25 May 2019, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk State Agricultural Academy Publ.; 2019, p. 57–64.

5. Repetskiy OV, Van Vinh Nguyen. Numerical analysis of strength characteristics of machine-building structures with mistuning parameters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta imeni A.A. Ezhevskogo* = Bulletin NGIEI. 2019;7:27–38.

6. Repetskiy OV, Do Man Tung. Study of characteristics of vibrations of mistuned bladed disks of turbomachines on the basis of reduced-order modeling by finite element method. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva* = Vestnik of SibGAU. 2014;1:60–66.

7. Repetsky OV, Barrow B. Application of sensitivity analysis for the study of systems with parameter detuning. Baikal Letter DAAD. 2016;1:86–98.

8. Hajmann B, Gert V, Popp K, Repeckij OV. Mechatronics: components, methods, examples, 2010, 601 p. (Russ. ed.: *Mekhatronika: komponenty, metody, primery*. Novosibirsk, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2010, 601 p.)

9. Beirow B, Figaschewsky F, Kühhorn A, Bornhorn A. Modal Analyses of an Axial Turbine Blisk with Intentional Mistuning. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2018;140(1):012503. https://doi.org/10.1115/1.4037588

10. Figaschewsky F, Kühhorn A. Analysis of Mistuned Blade Vibrations Based on Normally Distributed Blade Individual Natural Frequencies. ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, 15–19 June 2015, Montreal. Montreal; 2015, vol. 7B, p. GT2015-43121. https://doi.org/10.1115/GT2015-43121

11. Beirow B, Giersch T, Kuehhorn A, Nipkau J. Optimization-Aided Forced Response Analysis of a Mistuned Compressor Blisk. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2015;137(1):012504-1-012504-10. https://doi.org/10.1115/1.4028095

12. Beirow B, Kuehhorn A, Figashevsky F, Bornhorn A, Repetckii O. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2019;141:11008–11008-8.

13. Beirow B, Kühhorn A, Nipkau J. On the influence of Strain Gauge Instrumentation on Blade Vibrations of Integral Blisk Compressor Rotors Applying a Discrete Model. In: Conference ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. 8–12 June 2009, Orlando. Orlando; 2009, vol. 6, p. 245–253. https://doi.org/10.1115/GT2009-59207

14. Figashevsky F, Kuehhorn A, Beirow B, Giersch T, Nipkau J, Meinl F. Simplified Estimation of Aerodynamic Damping For Bladed Rotors. Part 2: Experimental Validation During Operation. In: ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. 13–17 June 2016, Seoul. Seoul; 2016, vol. 7, p. GT2016-56458. https://doi.org/10.1115/GT2016-56458

15. Bladh R, Castanier MP, Pierre C. Component-Mode-Based Reduced order modeling techniques for Mistuned bladed Disks. Part I: Theoretical Models. Journal of Engineering for Gas turbines and Power. 2001;123(8):89–99. https://doi.org/10.1115/1.1338947

16. Vyas NS, Rao JS. Fatigue Life Estimation Procedure for a Turbine Blade Under Transient Loads. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 1994;116(1):198–206. https://doi.org/10.1115/1.2906792

17. Ewins DJ, Han ZS. Resonant vibration levels of a mistuned bladed disk. Journal of Vibration and Acoustics. 1984;106(2):211–217. https://doi.org/10.1115/1.3269171

18. Gross J, Krack M, Schoenenborn H. Analysis of the Effect of Multirow and Multipassage Aerodynamic Interaction on the Forced Response Variation in a Compressor Configuration. Part II: Effects of Additional Structural Mistuning. Journal of Turbomachinery. 2018;140(5):051005. https://doi.org/10.1115/1.4038869

19. Repetckii O, Ryzhikov I, Nguyen Tien Quyet. Dynamics analysis in the design of turbomachinery using sensitivity coefficients. Journal of Physics: IOP Conf. Series. 2018;944:012096. Available from: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/944/1/012096/pdf [Accessed 18th February 2019]. (In Russ.) https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012096

20. Repetckii O, Ryzhikov I, Nguyen Tien Quyet. Investigation of mistuning impact on vibration of rotor bladed disks. Journal of Physics: IOP Conf. Series. 2018;944:012097. Available from: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/944/1/012097/pdf [Accessed 18th February 2019]. (In Russ.) https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012097

Критерии авторства

Рыжиков И.Н., Байроу 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

Ryzhikov I.N., Beirow 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

Рыжиков Игорь Николаевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: rin111@list.ru

Байроу Бернд,
доктор,
профессор кафедры структурной механики и динамики транспортных систем,
Бранденбургский технический университет,
03046, г. Котбус, Сименс-Хальске Ринг, 14,
Германия;
e-mail: beirow@b-tu.de

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor N. Ryzhikov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Engineering Technologies and Materials,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: rin111@list.ru

Bernd Beirow,
PhD,
Professor of the Department of Structural Mechanics and Transport System Dynamics,
Brandenburg University of Technology,
03046, Cottbus, Siemens-Halske Ring, 14, Germany;
e-mail: beirow@b-tu.de

Оригинальная статья / Original article
УДК 629.923.1
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1083-1092

Особенности формирования базы данных по силам резания для моделирования маятникового шлифования плоских поверхностей инструментов из сталей Р9М4К8 и Х12

© Я.И. Солер, А.В. Прокопьева, С.Н. Дрожжин
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – создание базы данных по силам резания P_z, P_y для возможности моделирования нагрузок на инструменты из сталей Р9М4К8 и Х12, а также на детали и узлы станка с использованием компьютерных программ. Усилия P_z дополнительно позволяют моделировать тепловые явления в зоне шлифования, которые являются неблагоприятным фактором при абразивной обработке и снижают работоспособность режущих инструментов и штампов. Измерение сил резания вели с использованием динамометрической системы фирмы Kistler с выводом полученной информации на компьютер. Получены поправочные коэффициенты к базовой модели, учитывающие холостые проходы по ширине шлифуемой поверхности. Установлено, что увеличение операционного припуска при шлифовании кругами из кубического нитрида бора не сопровождается ростом сил резания, что характерно для кругов из традиционных абразивов (в частности электрокорунда). Силы резания при шлифовании штамповой стали Х12 оказались больше, чем быстрорежущей стали Р9М4К8: P_y – в 1,2 раза, P_z – в 1,36 раза. Полученные результаты повысят эффективность использования CAE-систем (название для программ и программных пакетов от англ. Computer-aided engineering) в машиностроении, в частности при шлифовании. Подтверждено, что увеличение коэффициента шлифования $К_{шл} = P_Z/P_y$ отражает улучшение условий работы абразивных кругов. В частности, он увеличивается при выходе круга из контакта с заготовкой от 0,32 до 0,46 при обратном ходе в этой же зоне от 0,46 до 0,64.

Ключевые слова: силы резания, шлифование стационарное и нестационарное, рабочие и выхаживающие проходы, коэффициент шлифования

Благодарности: Работа проведена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (регистрационный номер проекта № 9.6484.2017/БЧ от 1 января 2017).

Информация о статье: Дата поступления 24 мая 2019 г.; дата принятия к печати 12 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2019 г.

Для цитирования: Солер Я.И., Прокопьева А.В., Дрожжин С.Н. Особенности формирования базы данных по силам резания для моделирования маятникового шлифования плоских поверхностей инструментов из сталей Р9М4К8 и Х12. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2019. Т. 23. № 6. С. 1083–1092. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1083–1092

Features of cutting force database formation for modeling of pendulum grinding of flat surfaces of tools made of R9M4K8 and X12 steels

Yakov I. Soler, Albina V. Prokopieva, Sergey N. Drozhzhin
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the article is to create a database on cutting forces P_z, P_y to enable the simulation of loads on the tools made of R9M4K8 and X12 steels and on machine-tool parts and components using computer programs. P_z forces additionally allow to simulate thermal phenomena in the grinding zone, which being an adverse factor in abrasive processing reduce the performance of cutting tools and dies. The cutting forces are measured using the Kistler dynamometer system and the output of the obtained information is presented in the computer. Correction factors to the basic model taking into account the idle passes by the width of the processed surface are obtained. It is found out that the increase in the operational allowance when grinding with cubic boron nitride wheels is not accompanied by an increase in cutting forces, which is typical for traditional abrasive wheels (in particular for electrocorundum). The cutting forces at grinding of die steel X12 are greater than those at grinding high-speed steel R9M4K8: P_y – by 1.2 times, P_z – by

1.36 times. The results obtained will increase the efficiency of using CAE-systems (Computer-aided engineering systems) in mechanical engineering, particularly in grinding. It is confirmed that the increase in the grinding coefficient $K_{gr} = P_Z/P_y$ reflects the improvement in the abrasive wheel operating conditions. In particular, it increases when the wheel comes out of contact with the workpiece from 0.32 to 0.46 at the reverse motion in the same zone from 0.46 to 0.64.

Keywords: cutting forces, stationary and non-stationary grinding, working and spark-out passes, grinding coefficient

Acknowledgements: The work has been carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project registration No. 9.6484.2017 / БЧ of January 1, 2017).

Information about the article: Received May 24, 2019; accepted for publication November 12, 2019; available online December 28, 2019.

For citation: Soler YaI, Prokopieva AV, Drozhzhin SN. Features of cutting force database formation for modeling of pendulum grinding of flat surfaces of tools made of R9M4K8 and X12 steels. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1083–1092. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1083-1092

1. ВВЕДЕНИЕ

Стали Р9М4К8 и Х12 нашли широкое распространение при изготовлении инструментов. Быстрорежущая сталь Р9М4К8 (HRC 67-68) обеспечивает повышение стойкости лезвийных инструментов в 3–5 раз по сравнению с Р18 при резании аустенитных и нержавеющих сталей и сплавов, а также легированных конструкционных сталей с повышенной твердостью на лезвийных инструментах, работающих с малой толщиной среза: развертки, зенкеры, протяжки и т.д., рабочие кромки которых нагреваются до 300–350°С[1]. Высокохромистая сталь Х12 обладает высокой прокаливаемостью и закаливаемостью. При большой твердости обладает несколько пониженной вязкостью по сравнению со сталями Х12М, Х12Ф, благодаря чему применяется для штампов простой формы, которые работают без значительных ударных нагрузок. Например, для вытяжных штампов[2].

На заключительных операциях механической обработки режущие инструменты подвергаются шлифованию. Абразивная обработка относится к числу наиболее распространенных способов резания, без которого не обходится практически ни одна из отраслей машиностроения. В частности в инструментальном производстве доля шлифовальных станков достигает 50–60%. По съему операционного припуска имеется две разновидности: маятниковое и глубинное. В данном исследовании рассматривается первая разновидность шлифования, которая на данный момент имеет наибольшее распространение в машиностроении и используется на окончательном этапе изготовления ответственных деталей с высокой точностью (5–8 квалитеты) и небольшой шероховатостью поверхности (R_a 0,16–1,25). Этот процесс характеризует небольшие глубины резания t = 0,005 – 0,05 мм и повышенные скорости продольного перемещения стола с заготовкой $s_{\text{пр}}$= 10–20 м/мин. Глубинное шлифование появилось сравнительно недавно в качестве альтернативы известным лезвийным методам обработки, например, фрезерованию. Оно позволяет за один проход снимать припуск в несколько десятков миллиметров при низкой скорости продольного стола $s_{\text{пр}}$ = 30–300 мм/мин [1, 2]. По мнению Старкова В.К. [3], при удалении припуска не более 2 мм по интенсивности съема материала оба варианта шлифования рассматриваются равноценными. При большей его величине целесообразнее использовать только глубинную схему резания. Шлифуемая поверхность по длине заготовки включает три этапа: врезание, постоянной длины контакта и переходный, который заканчивается полным выходом абразивного круга из кон-

[1]Арзамасов Б.Н., Соловьева Т.В. Справочник по конструкционным материалам. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2005. 640 с.
[2]Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.

такта с заготовкой. При глубинном шлифовании этапы врезания и переходный в результате большой глубины резания t играют значительную роль, а при маятниковом съеме операционного припуска их роль снижается до нуля. На первом этапе шлифования силы резания возрастают; на последнем – падают; на переходном – остаются на одном уровне [1, 2].

2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Суммарную силу резания при плоском шлифовании традиционным кругом без заборного конуса принято разлагать на две составляющие: тангенциальную P_z и нормальную (радиальную) P_y**.** Осевую составляющую P_x рассматривают равной нулю по двум обстоятельствам: если ширина круга $B_{\text{кр}}$ превышает ширину детали B или в более общем случае $(B_{\text{кр}} < B)$ поперечная подача выполняется вне зоны резания. Усилие P_z формирует работу резания и неблагоприятное тепловыделение [4, 5]. Усилие P_y вызывает деформации заготовки и узлов станка. Обе составляющие участвуют в формировании поверхностного слоя детали.

В литературных источниках в лучшем случае содержатся сведения о силах резания на рабочем ходе, завершающем съем операционного слоя. Модели сил могут быть экспериментальными и теоретическими. В первом случае они чаще всего аппроксимированы степенными функциями вида:

$$* B_{\text{кр}} > B \text{ [3, 5]} – \\ – \left(P_z , P_y \right) = \text{C}_\text{p} \cdot v_k^x \cdot s_{\text{пр}}^y \cdot t^z; \qquad (1)$$

$$* B_{\text{кр}} < B \text{ [6]} – \\ – \left(P_z , P_y \right) = \text{C}_\text{p} \cdot B \cdot v_k^x \cdot s_{\text{пр}}^y \cdot t^z. \qquad (2)$$

Показатели степени в (1), (2) находятся в диапазоне: $\text{x} < 0, y > z > 0$. Недостатком моделей (1), (2) служит то, что они имеют узкий диапазон применения, тесно увязаны с условиями эксперимента и не учитывают взаимодействие факторов.

В работе В.А. Носенко [7] представлены силы P_z, P_y при шлифовании торцов колец подшипников в виде полинома, полученные с помощью полного факторного эксперимента типа 2^4, которые позволяют учесть взаимодействия факторов в отличие от (1), (2).

В работах[6] [8, 9] представлен другой подход к поиску моделей сил резания, который рассматривает различную роль абразивных зерен на поверхности шлифованного круга вследствие их разновысотности расположения, которая характеризуется отношением [10, 11]

$$h/\rho , \qquad (3)$$

где h – глубина внедрения зерна в металл, ρ – радиус округления его вершины.

От величины (3) зависит роль, которую выполняют зерна на рабочей поверхности абразивного инструмента: при $h/\rho < 0{,}02$ – упругая деформация детали; при $0{,}02 < h/\rho < 0{,}3$ – пластическое оттеснение (выдавливание) металла по краям – микроцарапины без образования стружки; при $h/\rho > 0{,}3 – 0{,}5$ – срезание металла. Зерна из кубического нитрида бора (КБН) по сравнению с электрокорундом имеют в 2 раза меньшие ρ и большую остроту вершин примерно в том же диапазоне. Характер риски на обработанной поверхности зернами КБН указывает на то, что стружка отделяется путем срезания без выдавливания металла по ее краям. По результатам [12] классифицированы стружки трех типов:

[3]Зубарев Ю.М., Приемышев А.В. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов: учеб. пособ. СПб: Лань, 2010. 204 с.

[4]Васильев Е.В. Повышение производительности алмазного шлифования твердосплавных изделий и ресурса кругов выбором оптимальных схем и режимов шлифования и характеристики круга: дис. … канд. техн. наук: 05.02.08. Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2005. 16 с.

[5]Резников А.Н. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник. М.: Машиностроение, 1977. 391 с.

тонкие волосовидные, почти ровные, напоминающие сливные; стружка с одной гладкой и другой слегка шероховатой стороной и толстые элементные стружки. Следов оплавления стружки, которые часто встречаются при шлифовании кругами из традиционных абразивов, не обнаружено. Первый тип стружек характерен при использовании кругов из сверхтвердых абразивов: КНБ и синтетических алмазов.

Авторами[6] [8, 9] предложены линейные модели, в которых силы шлифования представлены функцией толщины срезаемого слоя, а коэффициенты моделей (4), (5) зависят от геометрических параметров абразивных зерен и определены с использованием алгоритма Нелдера – Мида:

$$P_{yj} = k_{ye} dS_j + k_{yc} a_j h_j(t); \quad (4)$$

$$P_{zj} = k_{ze} dS_j + k_{zc} a_j h_j(t), \quad (5)$$

где P_{yj}, P_{zj} – соответственно, нормальная и тангенциальная сила резания, приходящаяся на каждое зерно j; dS_j – длина линии контакта j-го элементарного отрезка режущей кромки с обрабатываемой поверхностью; a_j – характерная ширина зерна; $h_j(t)$ – толщина срезаемого слоя для центральной точки зерна; k_{yc} , k_{zc} – коэффициенты модели, характеризующие силы резания в радиальном и тангенциальном направлениях и зависящие от толщины срезаемого слоя.

В аналитических моделях используется условие равновесия внешних и внутренних сил, воздействующих на режущий элемент. Сказанное реализуется двумя основными составляющими: суммарной силой сдвига и суммарной силой трения по задней площадке абразивного зерна [1].

Для качественной оценки процесса шлифования целесообразно использовать коэффициент шлифования [13]:

$$К_{шл} = P_Z / P_y. \quad (6)$$

Согласно мнению, изложенному в работе [2], уменьшение коэффициента $К_{шл}$ свидетельствует о том, что меньшая часть работы резания уходит непосредственно на разрушение межатомных связей в материале заготовки, т.е. на съем металла, а большая – на преодоление сил трения и, как следствие, нежелательный нагрев заготовки.

Известно, что маятниковое шлифование относится к многопроходному процессу. Однако в представленных моделях сил резания операционный припуск не представлен, и отсутствуют сведения об условиях шлифования. Только в работе [2] указано, что при шлифовании сплава ВТ6 кругами из карбида кремния зеленого при возрастании числа проходов от 1 до 11 сила P_y увеличилась в 3,35, а P_z – в 2,74 раза. Для моделирования тепловых явлений необходимо иметь информацию о силах P_z при обратном ходе стола, а также характер их изменения по ширине и глубине заготовки. Сказанное обусловило необходимость проведения данного исследования.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Опыты вели на плоскошлифовальном станке модели 3Е711В с прямоугольным столом, совершающим возвратно-поступательные перемещения, при вращении абразивного инструмента по часовой стрелке. В качестве объекта исследования служили образцы цилиндрической формы с размерами $D \times L$: 40×40 мм из быстрорежущей стали Р9М4К8 ($i = 1$), 47×50 мм из штамповой стали Х12 ($i = 2$), шлифуемые по торцу. Образцы предварительно прошли стандартную для инструмента термическую обработку. Режущим инструментом при шлифовании является нитридборовый круг нормальной пористости 1А1 CBN30 B107 100 OV K27. Режим резания: скорость круга $v_к = 29$ м/с; $s_{пр} = 6$ м/мин; $s_п = 4$ мм/дв.ход (двойной ход); $t = 0{,}01$ мм; $z = 0{,}1$ мм;

[6]Кремень З.И., Буторин Г.И., Коломазин В.М. Технология обработки абразивным и алмазным инструментом: учебник. Л.: Машиностроение, 1989. 207 с.

СОЖ – 5-процентная эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-0014842-98), подаваемая поливом на заготовку в количестве 7–10 л/мин. Число дублирующих опытов $n = 30$. Опускание шпинделя на глубину резания вели в момент времени, когда стол с заготовкой смещался в крайнее левое положение относительно оператора. При использовании терминологии, принятой при цилиндрическом фрезеровании, рабочий ход стола ($q = 1$) выполняется по встречной схеме срезания металла, а обратный – выхаживающий ($q = 2$) – в условиях попутного шлифования.

Измерение сил P_y и P_z вели на динамометрическом комплексе фирмы Kistler [14], включающем динамометр модели 9257*B*, усилитель-преобразователь типа 5070*A*01110 и программное обеспечение DunoWare. При шлифовании образцы должны располагаться на столе динамометра строго по центру. Для этого использовали приспособление в виде плиты, которая 4-мя винтами крепилась к его столу, и стакана для крепления образцов $i = 1{,}2$ винтами.

В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены осциллограммы сил резания P_y (верхняя кривая) и P_z (нижняя кривая), записанные для двух двойных проходов продольного стола с заготовкой при двух поперечных подачах на двойной проход.

Наибольшие силы на участках 2, 6 соответствуют рабочему ходу, наименьшие в зонах 4, 8 – обратному (выхаживающему) проходу.

Из условий эксперимента известно, что круг имеет высоту (ширину) *B* = 10 мм и шлифование ведем при $s_{\text{п}} = 4$ мм/дв.ход, благодаря чему на первых 2–3-х проходах протекает увеличение ширины контакта круга с заготовкой. При этом в пределах первых 4 мм круг срезает металл, а на остальном переменном участке происходит выхаживание поверхности. Эта зона названа нами «участком врезания» ($j = 1$). При дальнейшем перемещении ($B \geq 10$ мм) круг начинает работать по всей своей высоте, на основании чего условия его работы приняты за стационарные ($j = 2$). Как только передний торец круга начинает выходить за пределы контакта с заготовкой, то ширина шлифования снижается и зона именована выходом ($j = 3$).

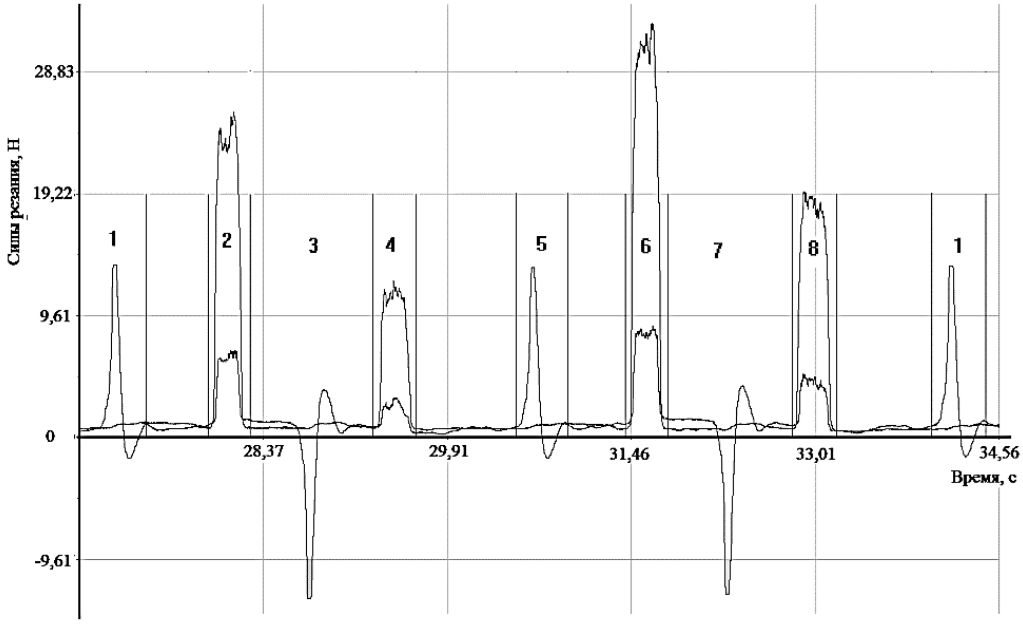


Рис. 1. Осциллограммы сил резания, где области: 2, 6 – врезание; 4, 8 – обратный ход; 1, 3, 5, 7 – реверс продольной подачи
Fig. 1. Oscillograms of cutting forces where the areas of 2, 6 – penetration; 4, 8 – reverse motion; 1, 3, 5, 7 – reverse of the longitudinal feed

Переменные условия шлифования необходимы для моделирования сил резания и в общем виде обозначены кодом (*i, j, q*): $i = \overline{1,2}$, $j = \overline{1,3}$, $q = \overline{1,2}$. В качестве базовых моделей приняты полиномы:

$$\hat{P}_y = f\left(s_{\text{пр}}, s_{\text{п}}, t, z\right) \times \\ \times k_{\text{м}yi} \cdot k_{\text{пол}\,yj} \cdot k_{xyq} \cdot k_{\text{прох}\,y}; \qquad (7)$$

$$\hat{P}_z = \psi\left(s_{\text{пр}}, s_{\text{п}}, t, z\right) \times \\ \times k_{\text{м}zi} \cdot k_{\text{пол}\,zj} \cdot k_{xzq} \cdot k_{\text{прох}\,z}, \qquad (8)$$

полученные методом полного факторного эксперимента с постоянными (детерминированными) коэффициентами с использованием множественного дисперсионного анализа (МДА) – модели I МДА [15]. В (7), (8) поправочные коэффициенты несут следующую смысловую нагрузку: $k_{\text{м}yi}$, $k_{\text{м}zi}, i = \overline{1,2}$ – коэффициенты, учитывающие марку инструментальной стали; $k_{\text{пол}\,yj}, k_{\text{пол}\,zj}, j = \overline{1,3}$ – коэффициенты, учитывающие положение зоны шлифования по ширине круглой заготовки; k_{xyq}, $k_{xzq}, q = \overline{1,2}$ – коэффициенты, учитывающие холостой проход продольного стола с заготовкой; $k_{\text{прох}\,y}$, $k_{\text{прох}\,z}$ – коэффициенты, учитывающие число проходов по глубине при снятии операционного припуска в установившейся зоне шлифования $j = 3$.

Методика получения базовых моделей (7), (8) описана в работах [16, 17]. В них поправочные коэффициенты равны единице при $i = q = 1, j = 2$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 и на рис. 2 представлены силы резания при шлифовании пластин Р9М4К8 по их ширине на 6-м двойном врезании по глубине.

В табл. 1 и на рис. 2 величина 16 мм учитывает врезание круга на полную высоту и его перебеги в конце прохода. Из представленных результатов видно, что

Таблица 1

Силы резания и коэффициенты шлифования при перемещении круга по ширине детали Р9М4К8 на 6-м проходе по глубине снимаемого припуска

Table 1

Cutting forces and grinding coefficients when moving the wheel by the width of the R9M4K8 part at the 6th depth pass of allowance removal

№ прохода	Рабочий ход, Н		Обратный ход, Н		$К_{шл}$ (6)	$К_{шл}^{обр.}$ (6)	$\frac{P_y^{обр.}}{P_y}$, %	$\frac{P_z^{обр.}}{P_z}$, %
	P_y	P_z	$P_y^{обр.}$	$P_z^{обр.}$				
4	0,5066	0,3540	0,3019	0,2357	0,6988	0,7808	59,59	66,58
8	27,3900	8,4840	6,3050	1,5810	0,3097	0,2508	23,02	18,64
12	40,0600	11,4300	15,1600	3,6740	0,2853	0,2423	37,84	32,14
16	41,7600	13,2400	17,1200	4,5230	0,3170	0,2642	41,00	34,16
20	47,7500	15,4100	20,9200	5,7430	0,3227	0,2745	43,81	37,27
24	46,8400	14,9400	19,1500	6,1650	0,3190	0,3219	40,88	41,27
28	46,4200	14,6800	20,8300	5,5600	0,3162	0,2669	44,87	37,87
32	44,4200	14,3700	19,9700	5,3890	0,3235	0,2699	44,96	37,50
36	46,7800	14,6200	20,5000	5,5240	0,3125	0,2695	43,82	37,78
40	44,4100	13,9100	21,8100	5,9270	0,3132	0,2718	49,11	42,61
44	37,2400	11,7600	16,4700	4,5170	0,3158	0,2743	44,23	38,41
48	19,1500	5,7310	6,8300	1,7640	0,2993	0,2583	35,67	30,78
52	2,1910	1,0010	0,6531	0,4150	0,4569	0,6354	29,81	41,46

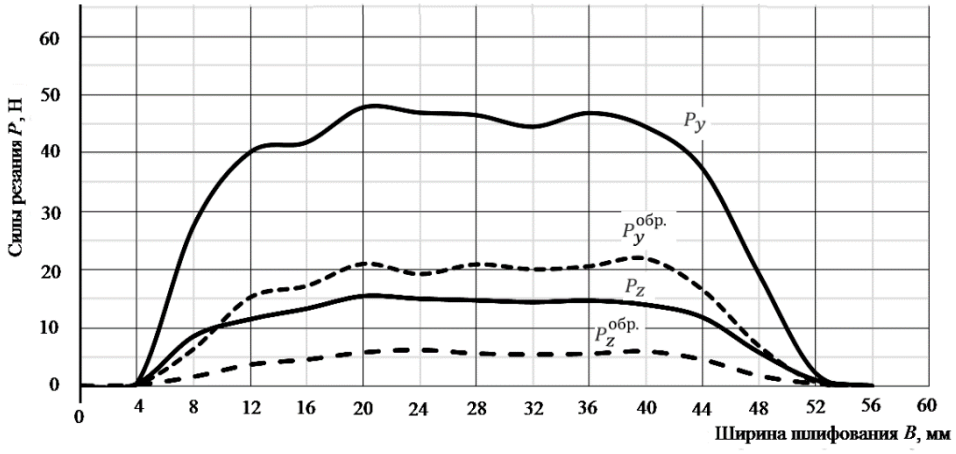


Рис. 2. Характер изменения сил резания при врезании круга в деталь Р9М4К8 по ширине (D+16) мм на 6-м проходе по глубине
Fig. 2. Cutting forces behavior at wheel penetration in a R9M4K8 part by the width of (D+16) mm on the 6th depth pass

наибольшие силы P_y, P_z имеют место на рабочем ходе при врезании круга в деталь в диапазоне $B = 20 - 28$ мм. На обратном холостом ходе силы $P_{y\,(\text{хол})}^{max}$, $P_{z\,(\text{хол})}^{max}$ смещаются до $B = 40$ мм. При этом коэффициент $К_{шл}$, напротив, снижается от 0,699 до 0,31 на рабочем ходе и от 0,78 до 0,27 при возвращении продольного стола в исходное положение. Рост сил P_y, P_z обусловлен увеличением ширины шлифования, а снижение коэффициента (6) – неполным срезанием металла в результате упругих отжатий шпинделя в пределах зазора в подшипниках станка. Как отмечено ранее, холостой ход стола выполняется без опускания круга на глубину *t,* поэтому в наибольшей мере снижается усилие P_z и отношение $\frac{P_z^{обр.}}{P_z}$ от 66,58 до 37,5%. В то же время отношение $\frac{P_y^{обр.}}{P_y}$ – только от 59,59 до 41–42%. Следует отметить, что силы P_y, P_z оказались при выходе из зоны шлифования в 1,5 раза меньше, чем при врезании. Сказанное обусловлено снижением ширины контакта круга с заготовкой на последних двух поперечных подачах.

При снятии операционного припуска $z = 0{,}1$ мм возрастание сил не обнаружено. Например, как при абразивном шлифовании титанового сплава в работе [9]. Аналогичные результаты по глубине снимаемого припуска подтверждены при шлифовании быстрорежущих пластин торцом чашечного круга из КНБ. В установившейся зоне шлифования рекомендуется использовать поправочные коэффициенты:

$$k_{\text{прох}\,y} = k_{\text{прох}\,z} = 1.$$

В табл. 2 представлены средние силы $\overline{\overline{P_y}}$, $\overline{\overline{P_z}}$ при всех 10-ти прямых и обратных проходов по глубине шлифования с учетом положения круга по ширине образцов из сталей Р9М4К8, Х12.

Из табл. 2 видно, что силы резания при шлифовании штамповой стали Х12 ($i = 2$) оказались больше, чем для стали Р9М4К8: $k_{му2} = 1{,}21$, $k_{mz2} = 1{,}36$.

При этом коэффициент $К_{шл}$ однозначно оказался наименьшим в стационарной зоне ($j = 2$), в которой отмечены наиболее неблагоприятные условия шлифования вследствие наибольшего контакта круга с заготовкой: $\overline{\overline{К}}_{шл} = 0{,}23 - 0{,}25$ – на рабочем ходе, $\overline{\overline{К}}_{шл}^{(обр)} = 0{,}28 - 0{,}31$ – на обратном (выхаживающем) ходе. Очевидно, что наименьшие (6) имеют место при шлифовании сталей Р9М4К8, хотя силы P_y, P_z – также наименьшие.

Сказанное обусловлено тем, что при шлифовании стали Р9М4К8 в большей мере снижаются тангенциальные усилия по всем зонам $j = \overline{1,3}$: в 1,28–1,45 раза. В аналогичной ситуации сила P_y имеет

Таблица 2

Средние силы $\overline{\overline{P_y}}$ и $\overline{\overline{P_z}}$ и коэффициенты шлифования $\overline{\overline{К}}_{шл}$, $\overline{\overline{К}}_{шл}^{обр.}$ для сталей Р9М4К8 и Х12 по ширине образцов при всех 10-ти проходах съема операционного припуска

Table 2

Average forces $\overline{\overline{P_y}}$ and $\overline{\overline{P_z}}$ and grinding coefficients $\overline{\overline{К}}_{шл}$, $\overline{\overline{К}}_{шл}^{обр.}$ for the steels R9M4K8 and X12 by sample width at all 10 passes of operational allowance removal

Положение круга (*j*)	Сталь *i*	Рабочий ход, Н		Обратный ход, Н		$\overline{\overline{К}}_{шл}$ (6)	$\overline{\overline{К}}_{шл}^{обр.}$ (6)	$\frac{\bar{\bar{P}}_y^{обр.}}{\bar{\bar{P}}_y}$, %	$\frac{\bar{\bar{P}}_z^{обр.}}{\bar{\bar{P}}_z}$, %
		$\bar{\bar{P}}_y$	$\bar{\bar{P}}_z$	$\bar{\bar{P}}_y^{обр.}$	$\bar{\bar{P}}_z^{обр.}$				
Врезание (1)	1	15,84	4,90	4,24	1,30	0,31	0,31	26,77	26,61
	2	20,24	6,85	5,24	1,86	0,34	0,35	25,86	27,07
Стацио-нарное (2)	1	42,17	9,76	10,93	3,01	0,23	0,27	25,93	30,81
	2	50,03	12,49	12,04	3,84	0,25	0,32	24,06	30,78
Выход круга (3)	1	12,11	3,81	3,87	1,08	0,31	0,28	31,97	28,44
	2	14,55	5,11	4,88	1,57	0,35	0,32	33,55	30,70

Примечание: $i = 1$ – Р9М4К8, $i = 2$ – Х12.

уменьшение в меньшей мере: в 1,2–1,28 раза. Вышесказанное свидетельствует о том, что уменьшение (6) не во всех случаях шлифования связано с ростом нагрузки на круг. По результатам, приведенным в табл. 2, получены коэффициенты к моделям (7), (8) по переходным зонам положения: $k_{пол\,y1} = 0{,}41$; $k_{пол\,z1} = 0{,}49$ и $k_{пол\,y3} = 0{,}36$; $k_{пол\,z3} = 0{,}39$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые получены поправочные коэффициенты: $(k_м,\ k_{пол\,j}, k_{x\,q}, k_{прох})_{(y,z)}$ к базовым моделям (7), (8), позволяющие моделировать силовые и температурные явления в зоне плоского шлифования сталей Р9М4К8 и Х12.

Библиографический список

1. Носенко В.А., Носенко С.В. Технология шлифования металлов // Тонкие наукоемкие технологии. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 616 с.
2. Федоров Д.Г., Скуратов Д.Л. Экспериментальное исследование качества поверхностного слоя и сил резания при плоском шлифовании титанового сплава ВТ6 // Вестник Самарского аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королева. 2015. Т. 14. № 3-2. С. 400–408. https://doi.org/10.18287/2412-7329-2015-14-3-400-408
3. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
4. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управлении качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 167 с.
5. Эльянов В.Д., Куликов В.И. Прижоги при шлифовании. М.: НИИМАШ, 1974. 63 с.
6. Безъязычный В.Ф., Прокофьев М.А. Вопросы оптимизации режимов плоского шлифования по параметрам качества поверхностного слоя высоконагруженных деталей из жаропрочных сплавов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2008. № 8. С. 2–4.
7. Носенко В.А., Тышкевич В.Н., Орлов С.В., Саразов А.В. Плоское шлифование торцов колец крупногабаритных подшипников с требуемым качеством поверхности // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. 2014. Т. 14. № 4. С. 67–78.
8. Воронов С.А., Киселёв И.А., Ма Вэйдонг, Ширшов А.А. Имитационная динамическая модель процесса шлифования сложнопрофильных деталей. Развитие методов моделирования // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 5. С. 40–58. [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-dinamicheskaya-model-protsessa-shlifovaniya-slozhnoprofilnyh-detaley-razvitie-metodov-modelirovaniya/viewer (25.01.19). https://doi.org/10.7463 /0515.0766577
9. Киселев И.А., Воронова И.С., Ширшов А.А., Николаев С.М. Имитационная динамическая модель процесса шлифования сложнопрофильных деталей. Модель инструмента и обрабатываемой детали // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 9. С. 1–16. [Электронный ресурс]. URL: http://technomag.bmstu.ru/doc/814388.html (25.01.19). https://doi.org/10.7463/0915.0814388

10. Никитин С.П. Моделирование процесса резания при шлифовании с учетом взаимодействия упругой и тепловой систем // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 12. № 4. С. 61–65.
11. Семко М.Ф., Грабченко А.И., Раб А.Ф. Основы алмазного шлифования. Киев: Техніка, 1978. 192 с.
12. Никифоров И.П. Современные тенденции шлифования и абразивной обработки. Старый Оскол: ТНТ, 2017. 560 с.
13. Утенков В.М., Быков П.А. Возможности использования динамометра *Kistler* для испытания металлорежущих станков // Инженерный вестник: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 10. С. 1–23. [Электронный ресурс]. URL: http://engsi.ru/doc/492011.html (27.01.19).
14. Кендалл М., Стюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды / пер. с англ. М.: Наука, 1976. 736 с.
15. Солер Я.И., Нгуен Чи Киен. Построение моделей и предсказание отклонений от плоскостности поверхностей деталей из сплава 1933Т2 при многопроходном шлифовании // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. № 2. С. 64–73.
16. Soler Ya.I., Chi Kien Nguyen. Modeling of the surface microrelief during multi-pass grinding of parts of variable rigidity from alloy 1933T2 // Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017. Vol. 9. № 1S. P. 1327–1340. https://doi.org/10.4314/jfas.v9i1s.768
17. Урывский Ф.П., Солер Я.И. Исследование сил резания при торцовом шлифовании быстрорежущих сталей алмазными и боразоновыми кругами // Производительность, качество обработки и надежность в эксплуатации изделий из жаропрочных и титановых сплавов: сб. статей. Куйбышев: Изд-во КуАИ, 1970. Вып. 43. С. 22–28.

References

1. Nosenko VA, Nosenko SV. *Metal grinding technology.* Staryj Oskol: Tonkie naukoemkie tekhnologii; 2013, 616 p. (In Russ.)
2. Fedorov DG, Skuratov DL. Experimental research of the surface layer quality and cutting forces in flat grinding of the BT6 titanium alloy. *Vestnik Samarskogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S.P. Koroleva* = Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2015;14(3-2):400–408. https://doi.org/10.18287/2412-7329-2015-14-3-400-408 (In Russ.)
3. Starkov VK. *Grinding with highly porous wheels*. Moscow: Mashinostroenie; 2007, 688 p. (In Russ.)
4. Sipajlov V.A. *Thermal processes at grinding and surface quality control*. Moscow: Mashinostroenie; 1978, 167 p. (In Russ.)
5. Jel'janov VD, Kulikov VI. *Burn marks at grinding*. Moscow: NIIMASh; 1974, 63 p. (In Russ.)
6. Bez"yazychnyj VF, Prokof'ev MA. Optimization issues of flat grinding modes by surface layer quality parameters of highly loaded parts from heat-resistant alloys. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal s prilozheniem* = Handbook. Engineering Journal with the application. 2008;8:2–4. (In Russ.)
7. Nosenko VA, Tyshkevich VN, Orlov SV, Sarazov AV. Flat grinding of big bearing races end with the demanded quality of a surface. *Vestnik yuzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie* = Bulletin of the South Ural State University. 2014;14(4): 67–78. (In Russ.)
8. Voronov SA, Kiselyov IA, Ma Weidong, Shirshov AA. Numerical simulation of a grinding process model for the spatial work-pieces: development of modeling techniques. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana* = Science and Education: scientific edition of Bauman MSTU. 2015;5:40–58. Available from: https://cyberleninka. ru/article/n/ imitatsionnaya-dinamicheskaya-model-protsessa-shlifovaniya-slozhnoprofilnyh-detaley-razvitie-metodov-modelirovaniya/viewer [Accessed 25th January 2019]. (In Russ.) https://doi.org/10.7463 /0515.0766577
9. Kiselev IA, Voronova IS, Shirshov AA, Nikolaev SM. Numerical simulation of a grinding process for the spatial work-pieces: a model of the work-piece and grinding wheel. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana* = Science and Education: scientific edition of Bauman MSTU. 2015;9:1–16. Available from: http://technomag.bmstu.ru/doc/814388.html [Accessed 25th January 2018]. (In Russ.) https://doi.org/10.7463/0915.0814388
10. Nikitin SP. Modeling of cutting operation in grinding subject to coupling elastic and thermal systems. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of Ufa State Aviation Technical University. 2009;12(4):61–65. (In Russ.)
11. Semko MF, Grabchenko AI, Rab AF. *Basics of diamond grinding*. Kiev: Texnika; 1978, 192 p.
12. Nikiforov IP. *Modern trends in grinding and abrasive processing*. Staryj Oskol: Tonkie naukoemkie tekhnologii; 2017, 560 p. (In Russ.)
13. Utenkov VM, Bykov PA. Possibilities of using the Kistler dynamometer for testing metal-cutting machine tools. *Inzhenernyj vestnik nauchnoe izdanie Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana* = Engineering Bulletin: scientific edition of Bauman MSTU. 2012;10:1–23. Available from: http://engsi.ru/doc/492011.html [Accessed 27th January 2019]. (In Russ.)
14. Kendall M, Styuart A. Multidimensional statistical analysis and time series, 1976, 736 p. (Russ. ed.: *Mnogomernyj statisticheskij analiz i vremennye ryady*. Moscow, Nauka, 1976, 736 p.).
15. Soler YaI, Nguyen Chi Kien. Model building and prediction flatness surfaces of details from 1933T2 alloy at multipass grinding. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* = Fundamental and Ap-

plied Problems of Technics and Technology. 2016;2:64–73. (In Russ.)
16. Soler YaI, Chi Kien Nguyen. Modeling of the surface microrelief during multi-pass grinding of parts of variable rigidity from alloy 1933T2. Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017;9(1S):1327–1340.
17. Uryvskij FP, Soler YaI. Studying cutting forces at face grinding of high-speed steels with diamond and borazon wheels. In: *Proizvoditel'nost', kachestvo obrabotki i nadezhnost' v ekspluatacii izdelij iz zharoprochnyh i titanovyh splavov* = Productivity, processing quality and operation reliability of products from heat-resistant and titanium alloys: collected articles. Kujbyshev: S. P. Korolev Kuibyshev aviation Institute; 1970, issue 43, p. 22–28. (In Russ.)

Критерии авторства

Солер Я.И., Прокопьева А.В., Дрожжин С.Н. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в одинаковой мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Soler Ya.I., Prokopieva A.V., Drozhzhin S.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

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.edu

Прокопьева Альбина Валерьевна,
старший преподаватель кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: albanoisa@yandex.ru

Дрожжин Сергей Николаевич,
старший преподаватель кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: drojjin@istu.edu

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.edu

Albina V. Prokopieva,
Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: albanoisa@yandex.ru

Sergey N. Drozhzhin,
Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: drojjin@istu.edu

Оригинальная статья / Original article
УДК 62-756.8
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1093-1103

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СНИЖЕНИЯ УДАРНО-ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

© А.В. Тычинский*,, Г.И. Коровин**, А.Н. Гаврилин***
**Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*
***ООО «ПК МИОН», г. Томск, Россия*

Резюме: Цель – разработка методики определения оптимальных режимов механообработки на фрезерных станках при помощи определения уровня вибрации и начального контакта зуба фрезы с заготовкой. Работа построена на применении экспериментальных данных, полученных методом замеров вибрационных характеристик, принятых за основу при определении оптимальных режимов фрезерования торцевой фрезой с шестигранной пластиной. В результате эксперимента разработана методика определения оптимальных режимов фрезерования (на основании полученных экспериментальных данных уровня вибрации), а также выявлена взаимосвязь линии первоначального контакта зуба фрезы с заготовкой посредством 3D-модели. На основе полученных экспериментальных данных уровня вибрации разработана методика определения оптимальных режимов фрезерования. На основании результатов проведенных исследований даны рекомендации по назначению оптимальных режимов обработки для фрезы с шестигранной пластиной, с учетом сопоставления полученных среднеквадратичных значений виброскорости и общетехническими нормативами допустимых значений общего уровня вибрации. Выявлена взаимосвязь линии первоначального контакта зуба фрезы с заготовкой посредством 3D-модели и уровнем вибрации.

Ключевые слова: технологическое оборудование, торцевое фрезерование, снижение ударно-вибрационных воздействий на инструмент, механообработка, режимы резания, 3D-модель

Информация о статье: Дата поступления 10 июня 2019 г.; дата принятия к печати 27 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2019 г.

Для цитирования: Тычинский А.В., Коровин Г.И., Гаврилин А.Н. Определение рациональных режимов торцевого фрезерования на основе снижения ударно-вибрационных воздействий. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2019. Т. 23. № 6. С. 1093–1103. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1093-1103

DETERMINATION OF FACE MILLING RATIONAL MODES BASED ON SHOCK-VIBRATION EFFECT REDUCTION

Aleksandr V. Tychinsky, Georgy I. Korovin, Aleksey N. Gavrilin
Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
Industrial Company MION LLC, Tomsk, Russia

Abstract: The purpose of the article is to develop a method for determining the optimal machining modes of milling machines by estimating the vibration level and initial contact of a cutter tooth and a workpiece. The work is based on the use of experimental data obtained by measuring vibration characteristics, which serve the basis for determining the optimal milling modes of the end mill with a hexagonal plate. The experiment results in the development of a methodology for determining optimal milling modes (based on the obtained experimental data of the vibration level), and identification of the relationship between the initial contact line of the cutter tooth and the workpiece by means of a 3D model. The methodology of determining the optimal milling modes is developed on the basis of the experimental data of the vibration level. Based on the results of the conducted studies, the recommendations are given on setting the optimal processing modes for a cutter with a hexagonal plate taking into account the comparison of the obtained RMS values of the vibration velocity and General technical standards of permissible values of the overall vibration level. The relationship is revealed between the line of initial contact of the cutter tooth and the workpiece by means of a 3D model and the level of vibration.

Keywords: technological equipment, face milling, reduction of shock-vibration effects on the tool, machining, cutting modes, 3D-model

Information about the article: Received June 10, 2019; accepted for publication November 27, 2019; available online December 28, 2019.

For citation: Tychinsky AV, Korovin GI, Gavrilin AN. Determination of face milling rational modes based on shock-vibration effect reduction. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1093–1103. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1093-1103

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известны различные методы снижения ударно-вибрационных воздействий на инструмент для повышения надежности и качества механообработки технологической системы. В технологической системе замыкающим звеном технологической цепи является зона резания, а одним из основных источников вибраций при резании – сам инструмент. Следовательно, существует необходимость снижения уровня вибраций путем оптимизации геометрических параметров фрезы и режимов механообработки, что повышает обрабатываемость конструкционных материалов, увеличивает стойкость инструмента, улучшает качество и точность механообработки и имеет практическую значимость в машиностроении.

Цель работы состоит в экспериментальном определении оптимальных технологических режимов механообработки для торцевой фрезы, которые обеспечат снижение ударно-вибрационных воздействий на инструмент при торцевом фрезеровании.

Проведенные раннее исследования [1–12] показали, что данный процесс требует дальнейшего экспериментального изучения, т.к. на основе полученных экспериментов существует потребность изменения геометрических параметров фрезы для снижения вибрационных характеристик.

Эффективность применения металлорежущих станков характеризуется показателями производительности, точности и надежности. Для фрезерных станков первого класса[1] которые присутствуют практически на каждом производстве, необходимо подобрать оптимальные технологические режимы фрезерования с наименьшим общим уровнем вибрации.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объект эксперимента – торцевая фреза 265-05045AR04HN09 (рис. 1) диаметром – Ø50 мм (производства ООО «Промышленная компания МИОН») с геометрическими параметрами: угол в плане φ = 45º, передний радиальный угол $\gamma_{рад}$ = -7º, передний осевой угол $\gamma_{ос}$ = -7º, число зубьев z = 4; оснащена твердосплавными пластинами HNCQ 090608 TN-M; группа применения твердого сплава – K20 ISO 513-75.

Для проведения эксперимента был использован фрезерный универсальный станок модели ФУ-321. Для измерения параметров вибрации использовали мобильный диагностический комплекс К5101, который включает в себя: акселерометры, измерительный модуль и персональный компьютер с установленным мобильным диагностическим комплексом «Виброрегистратор-М [13].



Рис. 1. Торцевая фреза 265-05045AR04HN09 производства ООО «Промышленная компания МИОН»
Fig. 1. 265-05045AR04HN09 end mill produced by Industrial Company MION LLC

[1]ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть I. Общие требования. Введ. 01.07.1999. М.: Изд-во стандартов, 1999.

Замеры произведены при попутном фрезеровании, заготовка квадратной формы 100х100 мм, материал – сталь 40Х по ГОСТ 4545-71 твердостью 200 НВ. Приспособление для закрепления заготовки – прижимы.

Три датчика были расположены на заготовке в трех осевых направлениях *x, y, z*. Схема расположения датчиков показана на рис. 2.

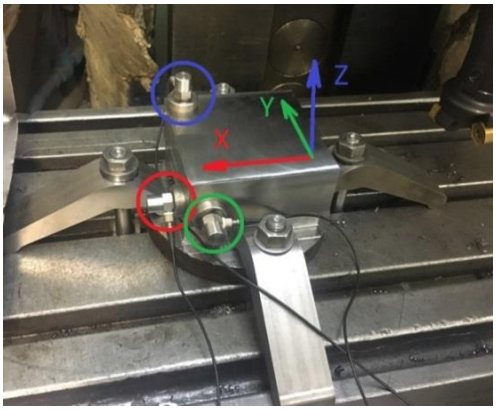


Рис. 2. Схема расположения датчиков
Fig. 2. Sensor location

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КОНТАКТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ШИРИНЫ ФРЕЗЕРОВАНИЯ

По 3D-модели фрезы, полученной в программном обеспечении SolidWorks, был произведен анализ контакта ее зуба с заготовкой в зависимости от параметра a_e – ширины фрезерования (рис. 3). Анализ показал, что в зависимости от ширины фрезерования возможны два типа контакта: в точке и по линии. На рис. 4 для наглядности показаны эти два типа первоначального контакта в зависимости от параметра a_e. Для эксперимента был выбран контакт в точке U (при a_e = 10 мм), в точке T (при a_e = 35 мм) и по линии TU (при a_e = 21,65 мм). Начальный контакт в точках S и V, а также по линиям SV, ST, UV, SU при данных геометрических параметрах фрезы невозможен, что обусловило, как показали дальнейшие экспериментальные исследования, повышенный уровень вибрации. На рис. 5 видно, что для того чтобы добиться первоначальных контактов необходимых линий, требуется изменить пространственное положение пластины относительно заготовки, что учтено при последующем проектировании новой фрезы и проведении дополнительных испытаний.

Также можно найти контакт зуба фрезы с заготовкой посредством уравнений, представленных в [14].

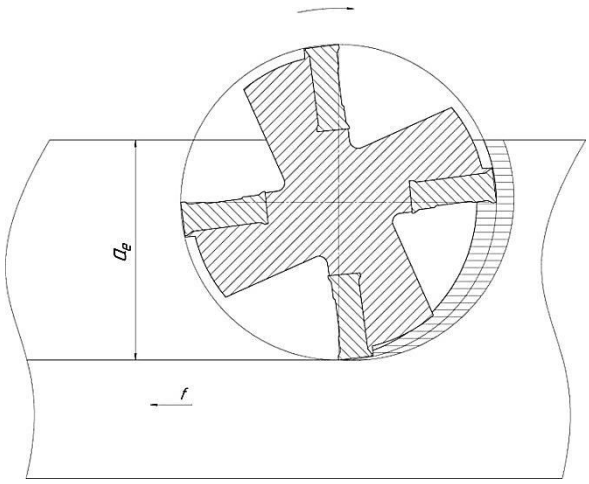


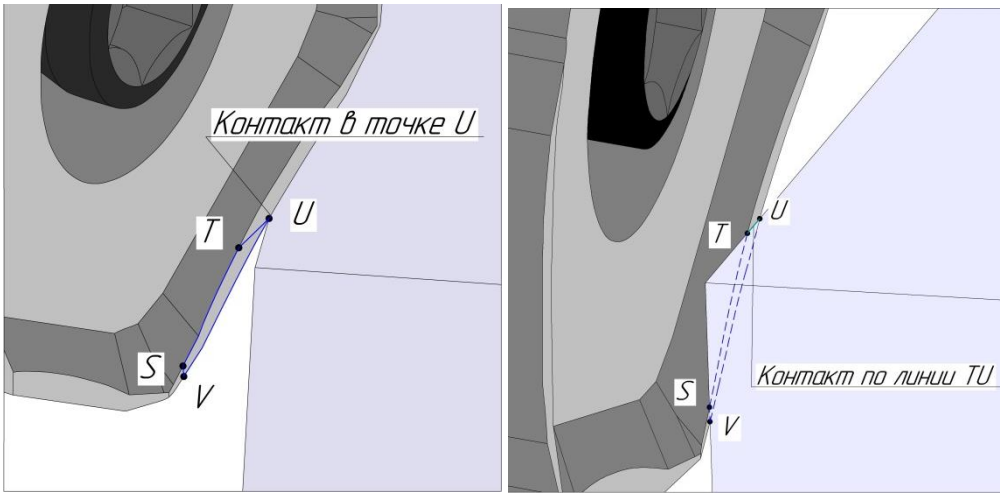
Рис. 3. Ширина фрезерования a_e
Fig. 2. Milling width a_e

4. ПЛАН ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проведены согласно плану эксперимента с тремя факторами, который представлен в таблице. Параметр глубины фрезерования (a_p) постоянен и равен 3 мм. Эксперименты проводились при попутном фрезеровании.

5. РЕГИСТРАЦИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Таким образом, целью данного эксперимента ставится определение оптимальных значений параметра ширины фрезерования. Под «оптимальностью» понимается фрезерование с относительно низким уровнем общей вибрации, т.е. минимальным среднеквадратичным значением (СКЗ) виброскорости. СКЗ является усредненной энергетической оценкой процесса. Измеряя СКЗ виброскорости, мы получаем пропорциональное кинетической энергии колебательного процесса значение.



a *b*

Рис. 4. Начальный контакт в точке (a), по линии (b)
Fig. 4. Initial contact in the point (a), along the line (b)

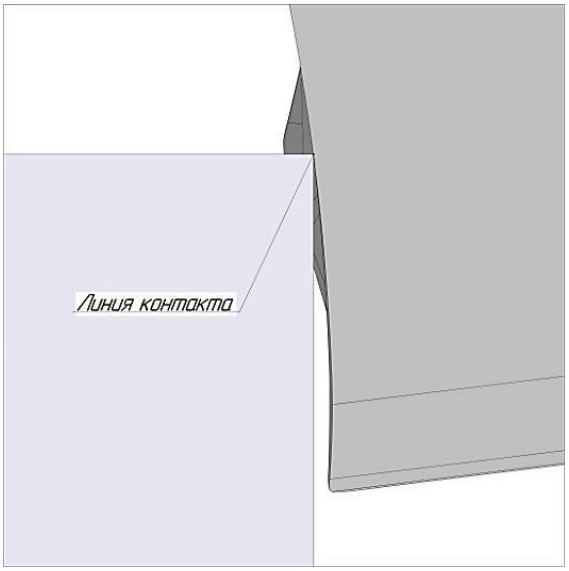


Рис. 5. Пространственное положение пластины относительно заготовки
Fig. 5. Spatial position of the plate relative to the workpiece

На рис. 6 представлена форма сигнала за один оборот фрезы, по которому можно в первом приближении анализировать динамику процесса фрезерования при n = 1000 об/мин, что соответствует оборотной частоте – $f_{об}$ = 16,67 Гц и зубцовой частоте – $f_z = f_{об} \cdot z$ = 66,67 Гц.

Пример полученных спектрограмм представлен ниже, по которому видны гармоники на зубцовых и оборотных частотах фрезы (рис. 7).

План эксперимента
Experiment plan

№	n, об/мин	S, мм/мин	a_e, мм	f_z, мм/зуб
1	800	100	10	0,031
2			21,65	0,031
3			35	0,031
4		125	10	0,039
5			21,65	0,039
6			35	0,039
7		160	10	0,05
8			21,65	0,05
9			35	0,05
10	1000	100	10	0,025
11			21,65	0,025
12			35	0,025
13		125	10	0,031
14			21,65	0,031
15			35	0,031
16		160	10	0,04
17			21,65	0,04
18			35	0,04
19	1250	100	10	0,02
20			21,65	0,02
21			35	0,02
22		125	10	0,025
23			21,65	0,025
24			35	0,025
25		160	10	0,032
26			21,65	0,032
27			35	0,032

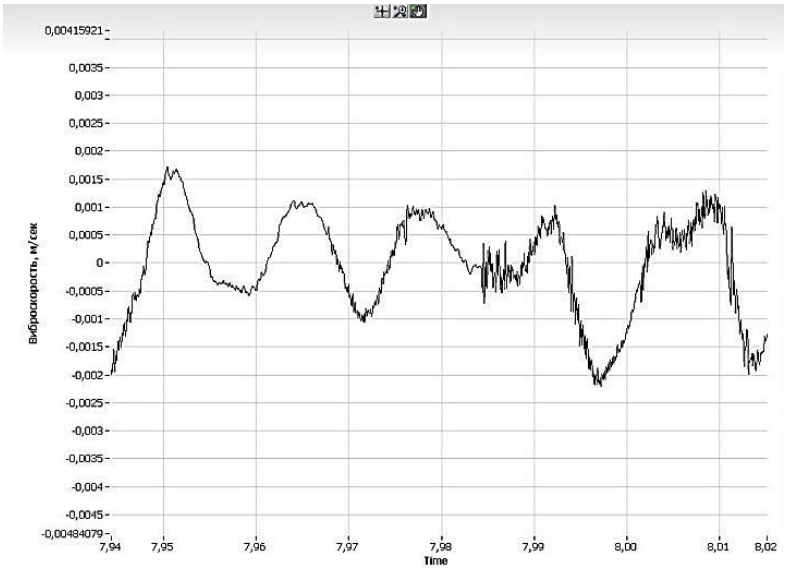


Рис. 6. Временной сигнал по координате x за один оборот при n = 1000 об/мин ($f_{об}$ = 16,67 Гц, f_z = 66,67 Гц)
Fig. 6. X-coordinate time signal per a revolution at n = 1000 rpm (f_{rev} = 16.67 Hz, f_z = 66.67 Hz)

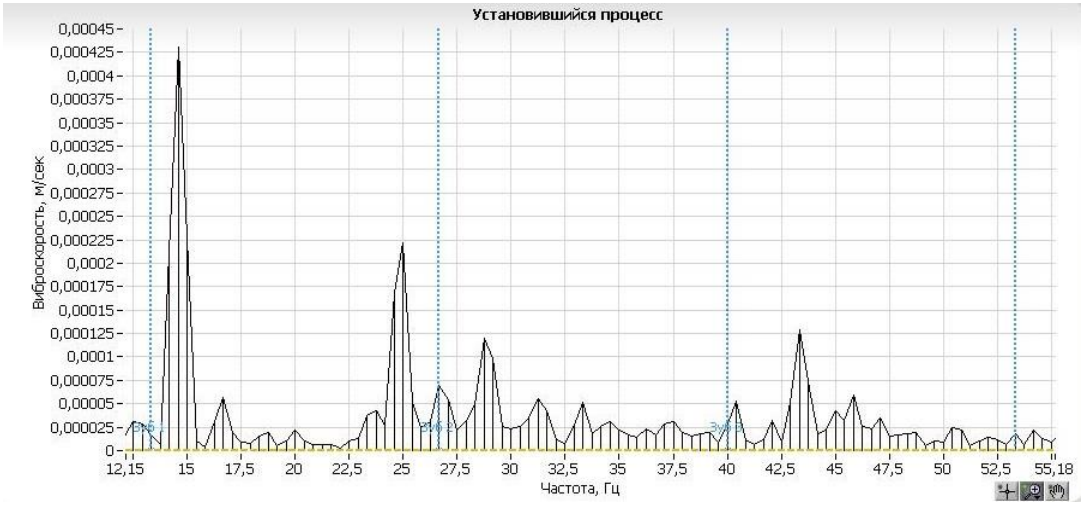


Рис. 7. Пример спектрограммы по координате x при a_e = 35 мм, n = 1000 об/мин, S = 160 мм/мин, ($f_{об}$ = 16,67 Гц, f_z = 66,67 Гц)
Fig. 7. Example of an X-coordinate spectrogram at a_e = 35 mm, n = 1000 rpm, S = 160 mm/min, (f_{rev}) = 16.67 Hz, f_z = 66.67 Hz)

Анализ приведенной на рис. 7 спектрограммы виброскорости показывает наличие:

– повышенного уровня вибрации на частоте 14,5 Гц, что объясняется присутствием резонансной частоты элементов заготовка-приспособление – инструмент. Это подтверждает спектрограмма по координате *x* при импульсном воздействии на заготовку (рис. 8);

– выраженных зубцовых составляющих, уровень которых снижается с повышением частоты.

Результаты эксперимента по определению общего уровня СКЗ виброскорости от режимов фрезерования приведены на рис. 9–11. Так как отсутствуют нормативы для конкретной фрезы, представляется целесообразным воспользоваться общетехническими нормативами, где красная линия – граница допустимых значений общего уровня вибрации по СКЗ виброскорости для первого класса машин мощностью до 15 кВт, новых, только что введенных в эксплуатацию, а также пригодных к эксплуатации машин без ограничения срока.

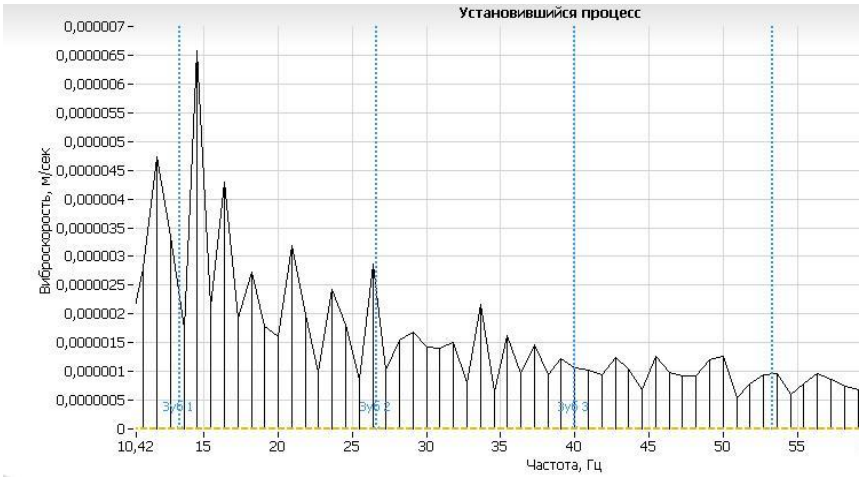


Рис. 8. Спектрограмма по координате x при импульсном воздействии на заготовку
Fig. 8. X-coordinate spectrogram under the pulsed impact on a workpiece

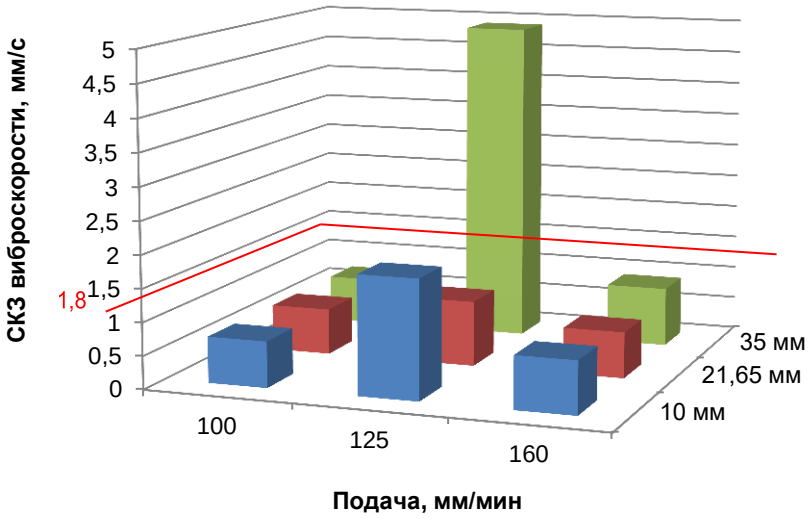


Рис. 9. Среднеквадратичное значение виброскорости при n = 800 об/мин по оси x
Fig. 9. RMS value of vibration velocity at n = 800 rpm on the X-axis

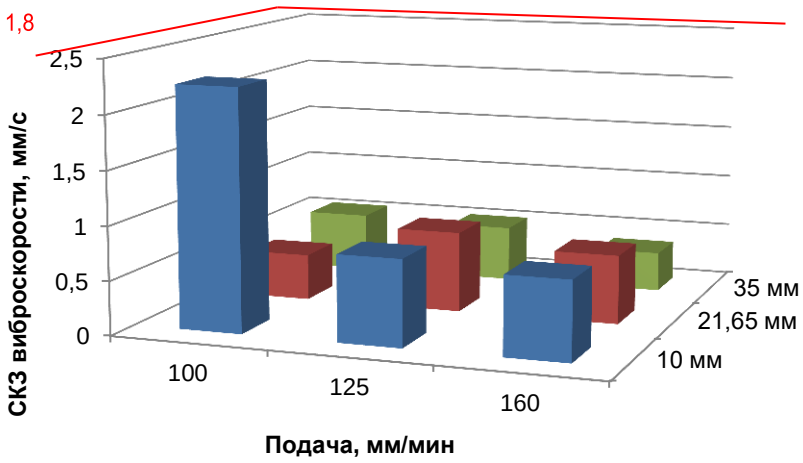


Рис. 10. Среднеквадратичное значение виброскорости при n = 1000 об/мин по оси x
Fig. 10. RMS value of vibration velocity at n = 1000 rpm, on the X-axis

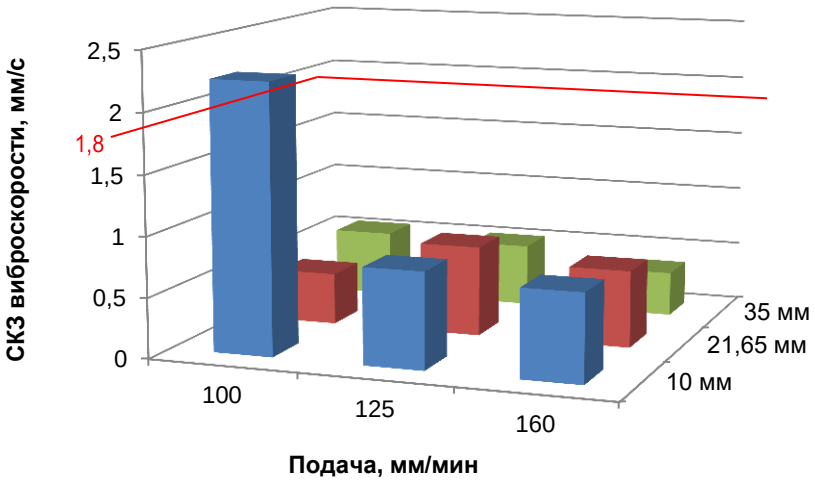


Рис. 11. Среднеквадратичное значение виброскорости при n = 1250 об/мин по оси x
Fig. 11. RMS value of vibration velocity at n = 1250 rpm on the X-axis

6. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ И ДАЛЬНЕЙШИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Анализ гистограмм с вибрационными характеристиками (см. рис. 9–11) для выбранных значений режимов механообработки в соответствии с планом эксперимента (см. таблицу) позволяет прийти к следующим выводам.

1. Выбранный параметр ae (ширина фрезерования) для линии контакта имеет минимальное влияние на уровень вибрации, также для данного параметра предпочтительна подача 100 мм/мин и 160 мм/мин.

2. Нежелательные сочетания режимов (см. рис. 9): a_e = 35 мм, s = 125 мм/мин n = 800 об/мин (эксперимент № 6, см. таблицу) – при данных условиях уровень вибрации увеличивается в 6,9 раза, в отличие от подачи в 100 мм/мин и в 5,4 раза, в отличие от подачи в 160 об/мин, а также эксперимент № 19 , при котором уровень вибрации увеличивается в 2,8 раза, в отличие от подачи в 125 мм/мин и в 3,06 раза – от подачи в 160 об/мин, что предположительно обусловлено нежесткостью технологической системы.

3. Для всех вибрационных диаграмм (см. рис. 9–11) с точки зрения вибрационных характеристик предпочтительнее варианты сочетания режимов резания при ширине фрезерования a_e = 21,65мм, выбранной для линии контакта, а также варианты № 1, 3, 7, 9, 12, 21, 22, 24, 25 и 27 (см. таблицу).

4. Величины общего уровня вибрации лежат в допустимых диапазонах за исключением режимов, которые категорически запрещаются (при них общий уровень вибрации СКЗ виброскорости превышает 1,8 мм/с), а именно: s = 125 мм/мин, n = 800 об/мин, a_e = 35 мм, n = 1250 об/мин, s = 100 мм/мин, a_e = 10 мм. Следует особо отметить, что экспериментальные исследования, проведенные на станке с наличием значительных люфтов, показали, что возможен подбор режимов, которые позволяют производить обработку с минимальными ударно-вибрационными нагрузками и максимальной производительностью. Это дает возможность существенно повысить время стойкости инструмента, о чем свидетельствуют результаты проведенного предварительного эксперимента на изнашивание зубьев фрезы на жестком станке – объема снятого материала, сопоставленного с экспериментом, при этом критического износа не было достигнуто (рис. 12).

Таким образом, разработанная методика эксперимента позволила определить рациональные режимы фрезерования торцевой фрезой с допустимыми уровнями вибрации, и выявить, при каких сочетаниях

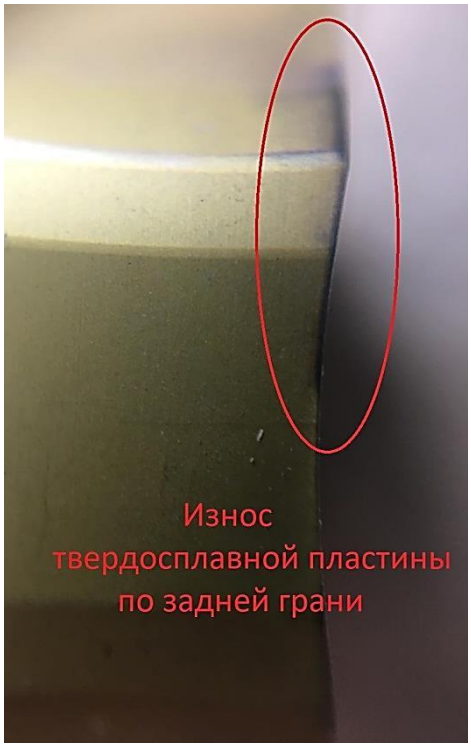


Рис. 12. Износ твердосплавной пластины после предварительного эксперимента
Fig. 12. Carbide plate wear after preliminary experiment

режимов фрезерования и геометрии корпуса фрезы возникает существенное повышение уровня вибраций.

На основе вышеизложенного можно также констатировать, что разработана оригинальная методика проведения эксперимента, сочетающая анализ возникновения вибрации в зависимости от типа контакта зуба фрезы с заготовкой при механообработке. Приведенная методика позволяет также повысить надежность работы, время стойкости инструмента, а также снижает время на конструкторско-технологическую подготовку производства. Основные пункты этой методики:

1) разработать технологическую карту вибрационного контроля процесса обработки торцевой фрезой с шестигранной пластиной на универсальном фрезерном станке ФУ-321;

2) определить контрольные точки расположения датчиков для замера вибрации;

3) разработать трехфакторный план эксперимента;

4) разработать 3D-модель для выявления вероятных вариантов контакта, определить контакт зуба фрезы с заготовкой по линии посредством 3Д-моделирования;

5) провести замеры вибрации (согласно разработанному плану эксперимента и построением гистограмм) и сравнить данные с общетехническими нормативами по общему уровню вибрации;

6) выявить режимы фрезерования с допустимым уровнем вибрации и проанализировать вероятные причины превышения допустимого уровня от режимов механообработки и геометрии корпуса фрезы, которые обусловливают первоначальный контакт в точке либо по линии;

7) выявить, какие из указанных выше режимов механообработки и геометрии корпуса фрезы оказывают максимальное влияние на уровень вибрации и возможности их снижения.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика определения оптимальных режимов фрезерования на основе полученных экспериментальных данных уровня вибрации с использованием

мобильного диагностического комплекса «Виброрегистратор-М» [13], что позволило определить оптимальные режимы обработки с наименьшим уровнем вибрации, а, как известно по источнику [15], снижение ударных вибрационных нагрузок однозначно приводит к увеличению стойкости инструмента, повышению надежности и качества, а также производительности механообработки.

На основе результатов проведенных исследований даны рекомендации по назначению оптимальных режимов обработки для выбранной фрезы с учетом сопоставления полученных среднеквадратичных значений виброскорости и общетехническими нормативами допустимых значений общего уровня вибрации.

Посредством 3D-моделирования и уровня вибрации выявлена взаимосвязь типа первоначального контакта зуба фрезы с заготовкой от общего уровня вибрации. При контакте по линии уровень вибрации не превышал допустимых пределов на протяжении всего эксперимента, в то время как контакт в точке в некоторых местах на порядок превысил данные нормы, что обусловливает прямую зависимость уровня вибрации от типа первоначального контакта зуба фрезы с заготовкой.

Библиографический список

1. Лукьянов А.В., Алейников Д.П., Вищенко М.В. Исследование пространственных вибраций и сил при высокопроизводительном фрезеровании // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 2. С. 598–603.
2. Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Исследование пространственной вибрации обрабатывающего центра в режиме фрезерования // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1. С. 96–101.
3. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Мониторинг динамического состояния обрабатывающих центров // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. VII Всерос. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 13–16 апреля 2016 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. С. 197–200.
4. Аршанский М.М., Щербаков В.П. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках. М.: Машиностроение, 1988. 134 с.
5. Драчев О.И. Технология вибрационной обработки и вибрационного точения маложестких деталей. Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении. Ирбит: Изд-во «Объединение научных инженерных коммерческих структур», 2015. 260 с.
6. Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Исследование колебаний сил взаимодействия фрезы с заготовкой при повышении скорости вращения шпинделя // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 4. С. 70–82. https://doi.org/10.26731/1813-9108.2017.4(56).70-82
7. Залога В.А., Нагорный В.М., Нагорный В.В. Контроль динамического состояния металлообрабатывающей технологической системы и прогнозирование ее ресурса. Сумы: Сумский государственный университет, 2016. 242 с.
8. Ahmadi K., Savilov A. Modeling the mechanics and dynamics of arbitrary edge drills // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2015. Vol. 89. P. 208–220. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.11.012
9. Altintas Y. Manufacturing Automation. Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 366 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.cambridge.org/core/books/manufacturing-automation/458526DE5ED43CC0FE1AEB19A80DEC06 (22.03.2019). https://doi.org/10.1017/cbo9780511843723
10. Jensen S.A., Shin Yung C. Stability Analysis in Face Milling Operations. Part 1: Theory of stability lobe prediction // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1999. Vol. 121. Issue 4. P. 600–605. https://doi.org/10.1115/1.2833075
11. Sastry S., Kapoor S.G., Devor R.E. Floquet Theory Based Approach for Stability Analysis of the Variable Speed Face-Milling Process // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2002. Vol. 124. Issue 1. P. 10–17. https://doi.org/10.1115/1.1418695
12. Cempel C. Determination of vibration symptom limit value in diagnostics of machinery // Maintenance management international. 1985. No. 5. P. 297–304.
13. Gavrilin A., Moyzes B., Cherkasov A., Mel'nov K., Zhang Xiaoliang. Mobile complex for rapid diagnosis of the technological system elements // Information-measuring equipment and technologies: MATEC Web of Conferences 79 01078 (2016) (Tomsk, 25–28 May 2016). Tomsk: EDP Sciences, 2016. P. 01078. https://doi.org/10.1051/matecconf/201679010 2016
14. Резников Н.И. Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1972. 200 с.
15. Козлов С.В. Влияние вибрации на качество фрезерованной поверхности деталей из титана и пути борьбы с вибрациями // Инновации в науке: научный журнал. 2018. № 8. С. 25–29.

References

1. Luk'yanov AV, Alejnikov DP, Vishchenko MV. Study of spatial vibrations and forces under high-performance milling. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* = Transport infrastructure of the Siberian region. 2017;2:598–603. (In Russ.)
2. Luk'yanov AV, Alejnikov DP. Research in the space vibration of machining center in milling mode. Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods Technology. 2014;1: 96–101. (In Russ.)
3. Alejnikov DP, Luk'yanov AV. Monitoring of dynamic state of machining centers. In: *Aviamashinostroenie i transport Sibiri: sbornik statej VII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii* = Aircraft engineering and transport of Siberia: Collected articles of VII All-Russian scientific and practical conference. 13–16 April 2016, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2016, p. 197–200. (In Russ.)
4. Arshanskij MM, Shcherbakov VP. *Vibrodiagnostics and control of metal cutting machine precision.* Moscow: Mashinostroenie; 1988, 134 p. (In Russ.)
5. Drachev OI. *Technology of vibration processing and vibration turning of low-rigid parts. Series: Quality management of technological processes in mechanical engineering*. Irbit: Ob"edinenie nauchnyh inzhenernyh kommercheskih struktur; 2015, 260 p. (In Russ.)
6. Lukyanov AV, Aleynikov DP. Analysis of oscillations of cutting forces between a mill and a workpiece when increasing the spindle rotation speed. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* = Modern technologies. System analysis. Modeling. 2017;4:70–82. (In Russ.) https://doi.org/10.26731/1813-9108.2017.4(56).70-82
7. Zaloga VA, Nagornyj VM, Nagornyj VV. *Monitoring of dynamic state of a metalworking technological system and predicting its resource.* Sumy: Sumy State University; 2016, 242 p.
8. Ahmadi K, Savilov A. Modeling the mechanics and dynamics of arbitrary edge drills. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2015;89:208–220. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.11.012
9. Altintas Y. *Manufacturing Automation. Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. Cambridge: Cambridge University Press; 2012, 366 p. Available from: https://www.cambridge.org/core/books/manufacturing-automation/458526DE5ED43CC0FE1AEB19A80DEC06 [Accessed 22nd March 2019]. https://doi.org/10.1017/cbo9780511843723
10. Jensen SA, Shin YC. Stability Analysis in Face Milling Operations. Part 1: Theory of stability lobe prediction. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1999;121(4):600–605. https://doi.org/10.1115/1.2833075
11. Sastry S, Kapoor SG, Devor RE. Floquet Theory Based Approach for Stability Analysis of the Variable Speed Face-Milling Process. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2002;124(1):10–17. https://doi.org/10.1115/1.1418695
12. Cempel C. Determination of vibration symptom limit value in diagnostics of machinery. Maintenance management international. 1985;5:297–304.
13. Gavrilin A, Moyzes B, Cherkasov A, Mel′nov K, Zhang Xiaoliang. Mobile complex for rapid diagnosis of the technological system elements. In: Information-measuring equipment and technologies: MATEC Web of Conferences 79 01078 (2016). 25–28 May 2016, Tomsk. Tomsk: EDP Sciences; 2016. P. 01078.
14. Reznikov NI. *Cutting of heat-resistant, high-strength and titanium alloys*. Moscow: Mashinostroenie; 1972, 200 p. (In Russ.)
15. Kozlov SV. Effect of vibration on quality of the milled titanium parts surface and ways to combat vibration. *Innovacii v nauke: nauchnyj zhurnal* = Innovations in science: a scientific journal. 2018;8:25–29. (In Russ.)

Критерии авторства

Тычинский А.В., Коровин Г.И., Гаврилин А.Н. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Tychinsky A.V., Korovin G.I., Gavrilin A.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

Тычинский Александр Викторович,
аспирант,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, ул. Тимакова, 13, Россия;
Инженер-конструктор,
ООО «ПК МИОН»,
634034, г. Томск, ул. Вершинина, 46/5, Россия;
✉ e-mail: alexandrtych@gmail.com

Коровин Георгий Иванович,
технический директор,
ООО «ПК МИОН»,
634034, г. Томск, ул. Вершинина, 46/5, Россия;
e-mail: kgimion@mail.ru

Гаврилин Алексей Николаевич,
кандидат технических наук,
доцент отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, ул. Тимакова, 13, Россия;
e-mail: tom-gawral@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr V. Tychinsky,
Postgraduate,
National Research Tomsk Polytechnic University,
13, Timakov St., Tomsk 634050, Russia,
Design Engineer,
PK MION LLC,
46/5, Vershinin St., Tomsk 634034, Russia,
✉ e-mail: alexandrtych@gmail.com

Georgy I. Korovin,
Technical Director,
PK MION LLC,
46/5, Vershinin St., Tomsk 634034, Russia,
e-mail: kgimion@mail.ru

Aleksey N. Gavrilin,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Materials Science of
Engineering School of New Manufacturing
Technologies,
National Research Tomsk Polytechnic University,
13, Timakov St., Tomsk 634050, Russia,
e-mail: tom-gawral@list.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.923
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1104-1115

Особенности формирования структуры, эксплуатационных свойств и качества поверхностного слоя штамповой оснастки из стали 3Х2В8Ф

© Н.С. Улаханов*, У.Л. Мишигдоржийн*, А.Д. Грешилов*, А.Г. Тихонов**
**Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ, Россия*
***Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

Резюме: Целью статьи является исследование формирования эксплуатационных свойств и параметров качества поверхностного слоя штамповой стали 3Х2В8Ф, используемой при изготовлении оснастки для горячей гибки титановых оковок путем технологически последовательных операций, включающих высокотемпературное диффузионное бороалитирование и окончательную механическую обработку. Для определения структурно-фазового состояния использованы методы оптической микроскопии и рентгенофазового анализа. Были проведены исследования по определению шероховатости поверхности и микротвердости поверхностного слоя. В результате бороалитирования при температуре более 1050°С на поверхности стали формируются диффузионные слои с композиционной структурой. После обработки при 950°С формируется диффузионный слой со слоистой структурой. Было установлено, что шероховатость поверхности после бороалитирования при температуре обработки 950°С увеличилась до *Ra* 4 мкм, а при температуре обработки 1050°С шероховатость возрастает до *Ra* 7,7 мкм при исходной шероховатости в обоих случаях *Ra* 1,5 мкм. Применение финишного шлифования в качестве окончательной механической обработки привело к снижению шероховатости с вышеупомянутых значений до *Ra* 0,09 мкм и *Ra* 0,43 мкм соответственно. Финишное шлифование обеспечивает требуемое качество поверхности с сохранением функциональных свойств диффузионного слоя, причем вопросы технологического обеспечения эксплуатационных свойств необходимо рассматривать в комплексе.

Ключевые слова: высокотемпературное бороалитирование, химико-термическая обработка, композиционная структура, эксплуатационные свойства, микротвердость, шероховатость

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-38-00939 мол_а).

Информация о статье: Дата поступления 30 сентября 2019 г.; дата принятия к печати 26 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2019 г.

Для цитирования: Улаханов Н.С., Мишигдоржийн У.Л., Грешилов А.Д., Тихонов А.Г. Особенности формирования структуры, эксплуатационных свойств и качества поверхностного слоя штамповой оснастки из стали 3Х2В8Ф. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 6. С. 1104–1115. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1104-1115

Formation features of structure, performance properties and surface layer quality of 3KH2V8F die steel tooling

© Nikolay S. Ulakhanov, Undrakh L. Mishigdorzhiyn, Anatoly D. Greshilov, Alexander G. Tikhonov
East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, Russia
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the article is to study the formation of performance properties and quality parameters of the surface layer of 3KH2V8F (3Х2В8Ф) die steel used in manufacturing of tooling for hot bending of titanium shields by technologically sequential operations including high-temperature diffusion boroaluminizing and final machining. The methods of optical microscopy and X-ray phase analysis are used to determine the structural-phase state. Studies are conducted to determine the roughness and microhardness of the surface layer. Boroaluminizing at a temperature of more than 1050°C results in the formation of diffusion layers with a composite structure on the steel surface. After processing at 950°C a diffusion layer with a layered structure is formed. It is found that the surface roughness after the boroaluminizing at 950°C increases up to *Ra* 4 *μm* while processing at the temperature of 1050°C increases the roughness up to *Ra* 7.7 μm whereas the initial roughness in both cases is *Ra* 1.5. Finishing grinding used as final machining decreases

roughness from the above values to *Ra* 0.09 *μm* and Ra 0.43 *μm,* respectively. Finishing grinding provides the required surface quality while maintaining the functional properties of the diffusion layer. It should be mentioned that the issues of technological support of performance properties must be considered in a complex.

Keywords: high-temperature boroaluminizing, thermal-chemical treatment, composite structure, performance properties, microhardness, roughness

Acknowledgements: The studies have been carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project 18-38-00939 mol_a).

Information about the article: Received September 30, 2019; accepted for publication November 26, 2019; available online December 28, 2019.

For citation: Ulakhanov NS, Mishigdorzhiyn UL, Greshilov AD, Tikhonov AG. Formation features of structure, performance properties and surface layer quality of 3KH2V8F die steel tooling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1104–1115. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1104-1115

1. ВВЕДЕНИЕ

Для повышения надежной эксплуатации несущего винта вертолета в условиях повышенной запыленности (пустынях, горных районах), а также для предотвращения повреждений противообледенительной системы на лонжероне и защиты от эрозионного износа передних кромок лопастей используют противоабразивные накладки (оковки) (рис. 1), изготовленные из титановых сплавов [1].

В Восточно-Сибирском государственном университете технологий и управления (Республика Бурятия) разработана технология и изготовлено прессовое оборудование горячей штамповки титановых оковок с применением метода радиационного нагрева галогеновыми лампами инфракрасного излучения [1–5]. Формообразование титановой оковки из сплава ОТ4-1 производится следующим образом (рис. 2): заготовка 4 устанавливается на рабочей поверхности матрицы 5; устройство радиационного нагрева с помощью поступательного движения $П_4$ вводится в рабочую зону пресса. Производится нагрев изделия (включаются лампы радиационного нагрева, длительность нагрева 80–120 с).

После окончания цикла нагрева лампы выводятся из рабочей зоны с помощью поступательного движения $П_3$, занимая исходное положение; после небольшой временной выдержки (не более 5 с) опускается шток гидроцилиндра 1 с пуансоном 2, таким методом осуществляется процесс горячей штамповки; производится выдержка пуансона в матрице с заготовкой (длительность выдержки 30 с); далее шток гидроцилиндра с пуансоном поднимается в исходное состояние.

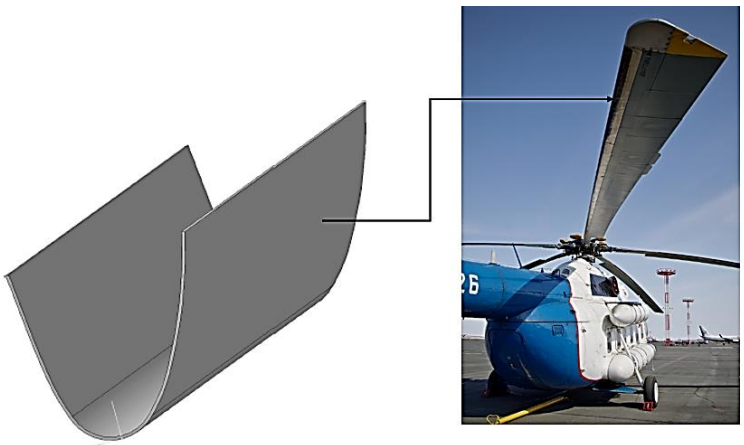


Рис. 1. Профиль титановой оковки
Fig. 1. Titanium shield profile

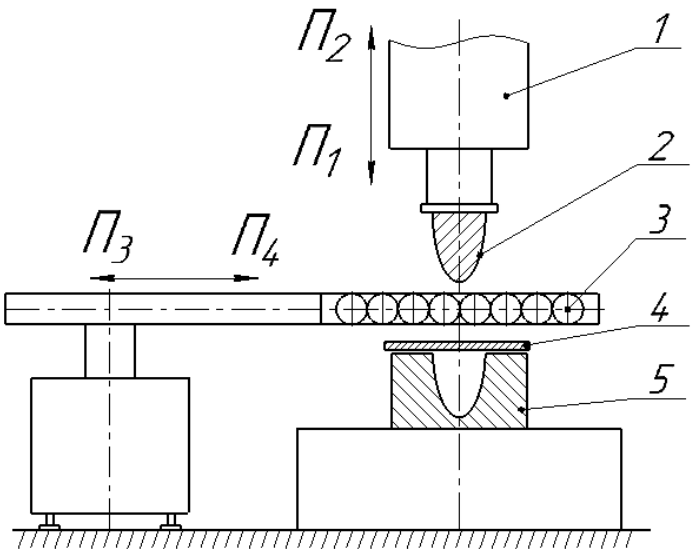


Рис. 2. Схема установки радиационного нагрева: 1 – гидроцилиндр; 2 – пуансон; 3 – устройство радиационного нагрева; 4 – заготовка; 5 – матрица
Fig. 2. Diagram of radiation heating installation: 1 – hydraulic cylinder; 2 – punch; 3 – radiation heating device; 4 – workpiece; 5 – matrix

Преимуществами радиационного нагрева являются [6]:

– высокая скорость нагрева заготовки;

– отсутствие необходимости разогрева оборудования перед началом эксплуатации;

– нагрев заготовки непосредственно в рабочей зоне штампа.

Применение используемого оборудования для горячей гибки оковок из титановых сплавов позволяет [6] улучшить следующие моменты:

– снизить вероятность окисления, а также появления газонасыщенного слоя;

– исключить операцию термостабилизации из технологического процесса гибки;

– повысить производительность обработки и снизить стоимость изготовления деталей.

Однако при этом возрастают требования к обеспечению функциональных свойств поверхностного слоя штамповой оснастки для горячей гибки, которая должна (исходя из служебного назначения) обладать следующими характеристиками:

– высокой износостойкостью для сохранения размеров и формы поковки;

– повышенной жаростойкостью для сопротивления образования окалины, возникающей из-за высокого перепада температур;

– высокой разгаростойкостью для предотвращения образования разгарных трещин, образующихся вследствие циклических нагревов и охлаждений штампа в процессе работы;

– минимальной схватываемостью со штампуемым изделием;

– низкой шероховатостью рабочих поверхностей ($Ra \leq 0{,}8$мкм).

При создании технологий упрочнения поверхностных слоев металлов и сплавов для придания повышенных эксплуатационных свойств широкое распространение получили такие методы химико-термической обработки (ХТО) как азотирование, цементация и борирование (диффузионное насыщение азотом, углеродом и бором, соответственно) [7]. Комплексное диффузионное насыщение бором и алюминием позволяет увеличить сопротивление износу, повысить жаростойкость, коррозионную стойкость и ряд других свойств поверхностных слоев деталей машин и инструментов [8]. Функциональные свойства зависят от множества факторов технологического процесса и формируются на этапах предварительной обработки поверхности,

диффузионного бороалитирования и финишной обработки рабочих поверхностей. В качестве финишной обработки штамповой оснастки в большинстве случаев используется шлифование, позволяющее обеспечить требуемые параметры шероховатости и точности рабочих поверхностей. Комплексное решение подобных задач актуально с позиции теории технологической наследственности [9, 10]. В связи с этим исследование возможности создания функциональных свойств рабочих поверхностей штампов в более широком диапазоне путем диффузионного насыщения (бороалитирование) и последующей окончательной финишной обработки является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является исследование формирования эксплуатационных свойств штамповой стали 3Х2В8Ф, используемой при изготовлении оснастки для горячей гибки титановых оковок путем технологически последовательных операций, включающих высокотемпературное диффузионное бороалитирование (ВБА) и окончательную механическую обработку.

2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

ХТО осуществляли в насыщающих пастах, содержащих порошки карбида бора, алюминия и фторида натрия в качестве активатора следующего состава: 80% B_4C + 16% Al + 4% NaF.

Порошки предварительно замешивались на органическом клее (цапонлаке) до пастообразной композиции. Образцы из инструментальной стали 3Х2В8Ф (таблица) помещались в прямоугольные формы вместе с пастой (рис. 3). После утрамбовки формы удаляли, а полученные брикеты просушивали при температуре 50–100°С в течение двух часов в сушильной камере. После этого брикеты загружали в предварительно нагретую до температуры обработки печь. Длительность выдержки составляла 2 ч, температура обработки – 950 и 1050°С. Охлаждение образцов проводили вне печи на спокойном воздухе при комнатной температуре.

Окончательная механическая обработка (ОМО) проводилась на вертикально-фрезерном станке с числовым программным управлением Romi D800. Инструмент – эльборовая шлифовальная головка для координатной шлифовки МГШ 10,0х10,0 диаметром 10 мм, зернистостью ЛКВ60/250 (рис. 4 *а*) производства компании «МонАлиТ», изготовленная методом вакуумно-диффузионной сварки эльборовых зерен. Скорость резания составляла 250 м/мин, подача – 0,08 мм/мин, глубина резания – 0,05 мм. Схема шлифования представлена на рис. 4 *b*, где 1 – обрабатываемая деталь, 2 – эльборовая шлифовальная головка, *Dr* – главное движение резания, *Ds* – движение подачи.

Микроструктуру образцов исследовали на металлографическом микроскопе «МЕТАМ РВ-34». Шероховатость поверхности до и после борирования, а также после механической обработки проводили на профилометре Taylor Hobson Form Talysurf i200 в научно-исследовательской лаборатории технологии высокопроизводительной механической обработки Иркутского национального исследовательского технического университета. Микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 0,5 Н.

Химический состав стали 3Х2В8Ф
Chemical composition of 3KH2V8F/3X2B8Ф steel

Массовая доля элементов, %									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	W	V
0,3–0,4	0,15–0,4	0,15–0,4	до 0,03	до 0,03	2,2–2,7	до 0,35	до 0,03	8,5–10,0	0,3–0,6

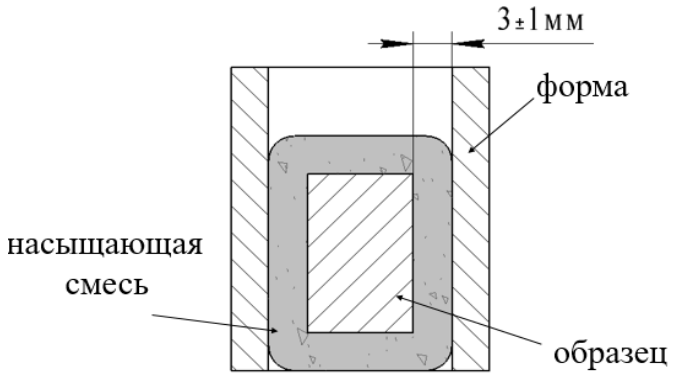
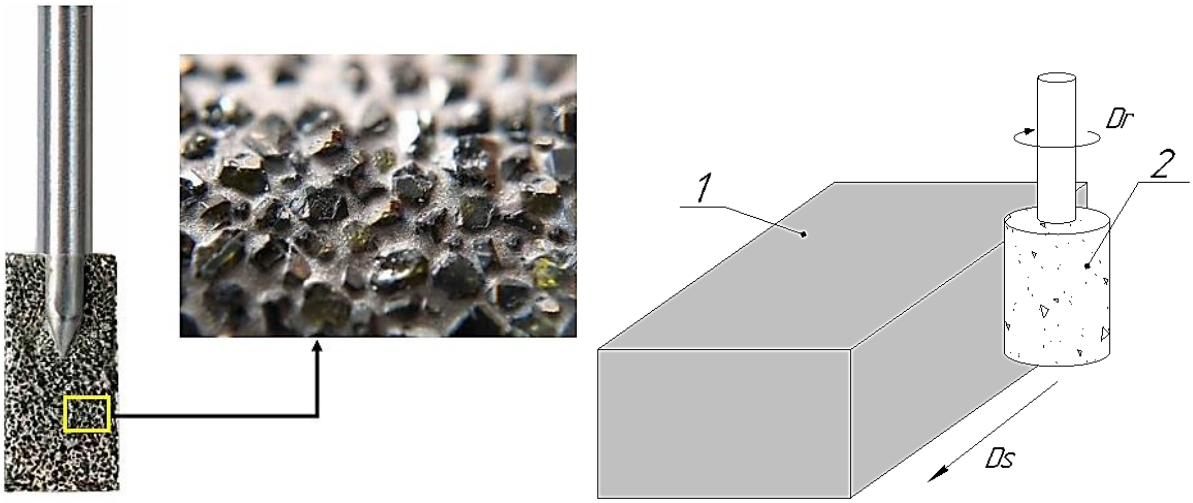


Рис. 3. Схема упаковки образцов
Fig. 3. Sample packing diagram



a *b*

Рис. 4. Цилиндрическая эльборовая головка (a); схема шлифования (b) [11]
Fig. 4. Cylinder-shaped cubic boron nitride head (a); grinding scheme (b) 11]

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ФОРМИРОВАНИЮ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ

При разработке технологических процессов, рассматриваемых в комплексе, необходим системный подход, который позволит оценить роль каждого вида обработки на формирование эксплуатационных свойств поверхностного слоя. Взаимосвязь выходных и входных параметров процессов можно представить в виде схемы, представленной на рис. 5.

Основная задача механической обработки перед диффузионным бороалитированием – формирование требуемого рабочего профиля штампа с учетом припуска на химико-термическую и финишную обработку, а также обеспечение шероховатости поверхности не более *Ra* 2,5 мкм [12]. В большинстве случаев в качестве такой обработки целесообразно использовать фрезерование.

Работоспособность поверхностей штампов может быть обеспечена при оптимальных значениях основных параметров формируемого диффузионного слоя (толщина, микротвердость, фазовый состав, структура), получаемого химико-термической обработкой. В соответствии с требованиями к свойствам разработано положение о структуре диффузионного слоя, которую

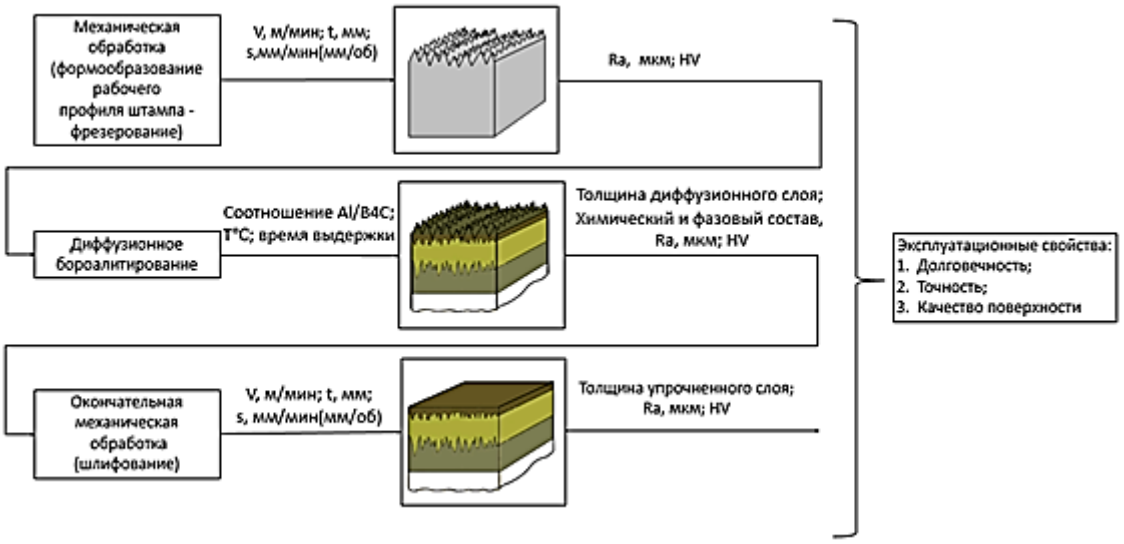


Рис. 5. Схема формирования эксплуатационных свойст
Fig. 5. Diagram of performance property formation

можно представить в виде принципиальной схемы (рис. 6). Диффузионный слой содержит несколько составляющих зон, каждая из которых имеет собственное функциональное назначение. Зона 3 – переходная, непосредственно примыкающая к инструментальной основе, должна обеспечивать адгезионную связь диффузионного слоя с материалом матрицы. Свойства переходной зоны и инструментальной основы должны быть максимально идентичны по тепло- и физико-механическим свойствам во избежание возникновения остаточных напряжений и отслоения диффузионного слоя. Зона 2 служит в качестве барьерной, снижая интенсивность теплового потока в основу матрицы, а также осуществляет связи между зонами 1 и 3 диффузионного слоя. Зона 1 выполняет основные функции, контактируя с заготовкой в процессе деформирования. Она должна обладать высокой контактной прочностью, пластичностью, повышенной износостойкостью и требуемыми параметрами микрогеометрии (шероховатость). Варьируя состав насыщающей смеси и температурно-временные параметры диффузионного бороалитирования, а также режимы окончательной механической обработки, можно получать поверхность с заданными эксплуатационными характеристиками.

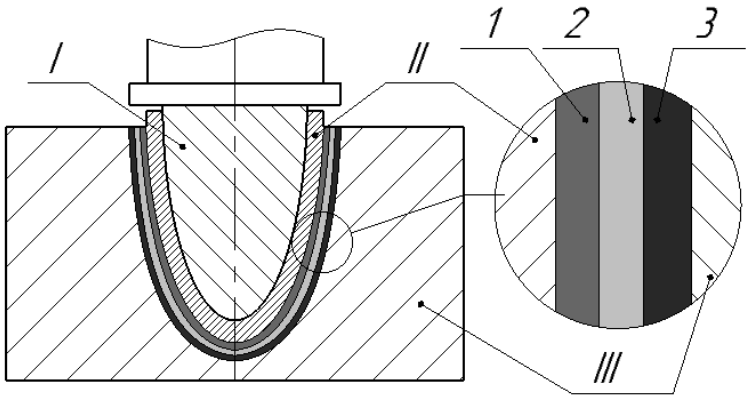


Рис. 6. Принципиальная схема диффузионного слоя
на поверхности штампа: I – пуансон, II – заготовка, III – матрица [11]
Fig. 6. Schematic diagram of a diffusion layer on the die surface: I – punch, II – workpiece, III – matrix [11]

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

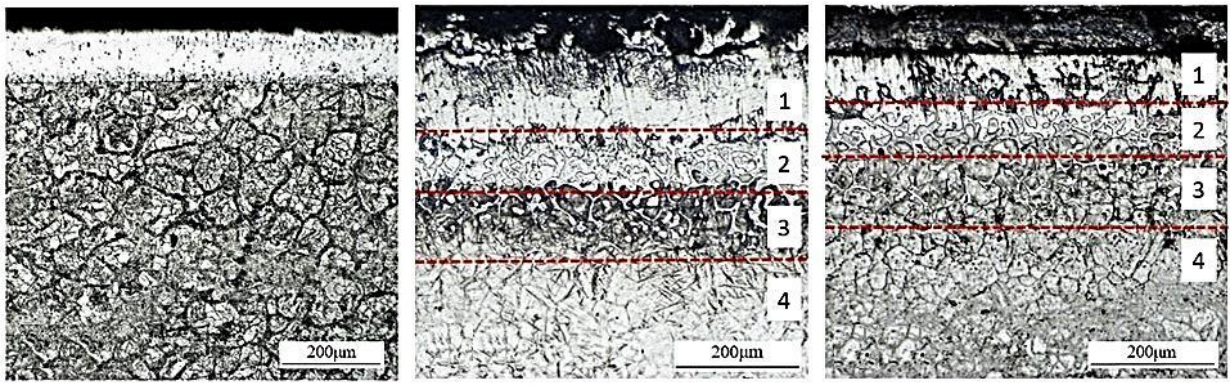
Эксперименты показали, что при температуре бороалитирования 950°С формируется преимущественно алитированный слой со слоистой структурой (рис. 7 *a*). Алюминий, как более активный компонент смеси, реагирует с активатором быстрее карбида бора с образованием фторидов AlF и AlF_2. Глубина слоя составляет 140 мкм.

Обработка свыше 1050°С (рис. 7 *b*) приводит к формированию слоев с композиционной структурой [13, 14], где вязкие (твердые растворы) образуют сплошную матрицу, а твердые структурные составляющие (бориды) располагаются в виде изолированных друг от друга включений. Данное строение обусловливает высокие механические свойства, в частности износостойкость и повышенную пластичность. Помимо этого, высокотемпературная ХТО позволяет нивелировать слоистость (фазовую неоднородность по глубине диффузионного слоя), а также увеличить толщину слоя до 380 мкм.

На износостойкость, и, следовательно, долговечность штамповой оснастки значительное влияние оказывает шероховатость поверхности. В источнике [12] отмечается, что процесс борирования может быть использован как окончательный метод обработки детали и не приводит к изменению шероховатости. Однако в этой работе исследовался процесс низкотемпературного жидкостного борирования углеродистых сталей. В настоящее время отсутствуют сведения о качестве поверхностного слоя изделий из инструментальных сталей, подвергаемых ВБА. С целью снижения шероховатости поверхностных слоев и удаления верхней пористой зоны было осуществлено шлифование по указанными ранее режимам. Исследование топографии до и после шлифования показало, что чистоту поверхности можно довести до *Ra* 0,4 мкм шлифованием, по сравнению с исходными *Ra* 7,7 мкм после ВБА. При этом функциональные свойства обеспечиваются в полной мере оставшимися зонами диффузионного слоя на образце, подвергнутом обработке свыше 1000°С (рис. 7 *c*). На рис. 8 приведена диаграмма изменения шероховатости поверхности образцов до и после ВБА, а также после механической обработки. Как видно из диаграммы, на рост шероховатости после ВБА оказывает влияние повышение температуры процесса и времени выдержки. После шлифования эльборовыми шлифовальными головками по указанным ранее технологическим режимам обработки шероховатость поверхности снижается, причем наблюдается влияние технологической наследственности.

Согласно схеме, представленной на рис. 5, бороалитирование при 1050°С более предпочтительно для формирования эксплуатационных свойств на поверхности стали 3Х2В8Ф, используемой при изготовлении штамповой оснастки для процессов горячей штамповки. Диффузионный слой, формируемый при данных технологических режимах, имеет большую толщину, что позволяет сохранить свойства поверхностного слоя, формируемые ХТО после проведения операции финишного шлифования.

На рис. 9 представлена рентгенограмма поверхности стали после ХТО при температуре 1050°С. Фазовый анализ выявил наличие характерных для бороалитирования фаз – FeB и Fe_3Al. Помимо боридов и алюминидов в диффузионном слое присутствуют Fe_2O_3 и Fe_7W_6. Наличие первого объясняется диффузией кислорода через насыщающую пасту, что приводит к формированию оксида железа в верхней зоне слоя. Согласно диаграмме состояния «Fe-W» формирование ферровольфрама Fe_7W_6 маловероятно при температуре проведения ХТО (рис. 10). Образование данной фазы возможно при температуре не ниже 1190°С [15]. Авторы работы [16] отмечают наличие карбида Fe_3W_3C в структуре стали Н21 (аналог стали 3Х2В8Ф). В процессе диффузионного насыщения происходит вытеснение карбидов с поверхности и их концентрация в нижних слоях. Было установлено, что твердость карбидов составляет более 3000 HV. Таким образом,



a *b* *c*

Рис. 7. Микроструктуры бороалитированных слоев стали 3Х2В8Ф, ×100: a – образец 1 (t = 950°С, 2 ч); b – образец 2 (t = 1050°С, 2 ч); c – образец 2 после механической обработки
Fig. 7. Microstructures of the boroaluminized layers on 3KHaV8F/3X2B8Ф Steel, × 100: a – sample 1 (t = 950°C, 2 hours); b – sample 2 (t = 1050°C, 2 hours); c – sample 2 after machining

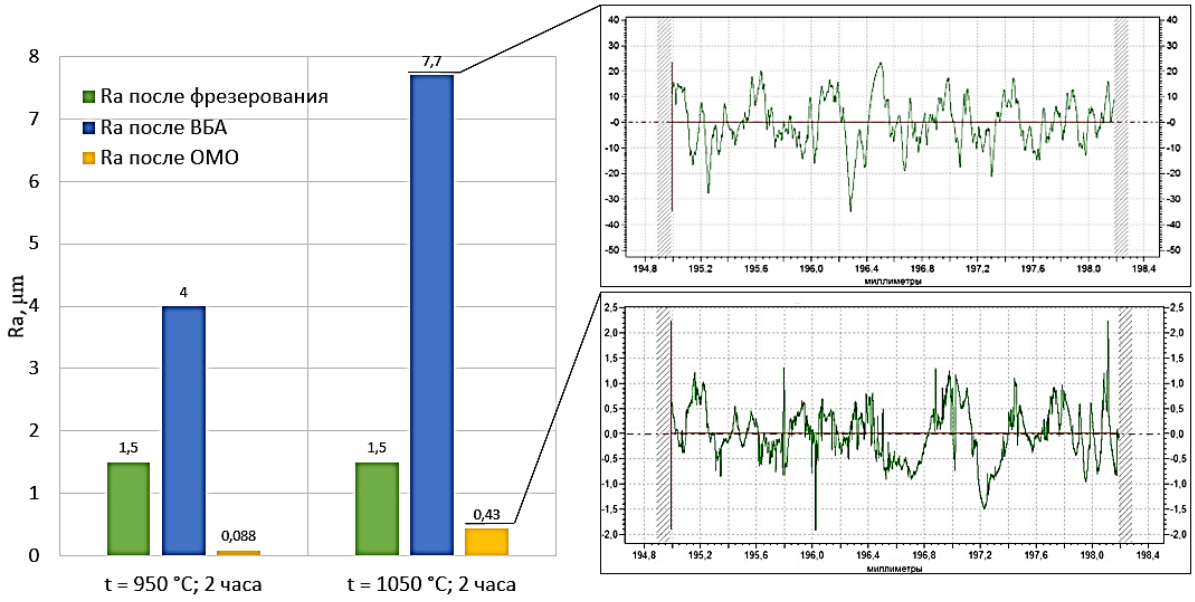


Рис. 8. Диаграммы изменения шероховатости поверхности
Fig. 8. Diagrams of surface roughness distribution

наряду с боридом железа они способны обеспечить высокие механические свойства слоя, такие как сопротивление износу в условиях контактного трения.

Распределение микротвердости существенно различается в зависимости от температуры обработки (рис. 11). Более низкая температура обработки приводит к образованию только мягких фаз, поэтому микротвердость основного металла выше по сравнению со слоем. Микротвердость мягких фаз составляет 300 HV и 470 HV, что характерно для алюминидов с низким содержанием алюминия и твердых растворов. Микротвердость основного металла практически постоянна во всем поперечном сечении и ее значение составляет около 500 HV.

Совершенно другой профиль микротвердости был получен на образце, обработанном при 1050°С. Высокий начальный пик 2200 HV на профиле соответствует бориду железа в верхней части слоя. Затем микротвердость падает до минимального значения около 300 HV. Это падение можно отнести к зоне алюминида железа Fe_3Al.

Несмотря на присутствие очень твердых соединений, таких как карбиды, в композитном слое среднее значение составляет около 700–800 HV на глубине 100 и 600 мкм от поверхности. Сложность микроструктуры в этой области приводит к значительным изменениям микротвердости.

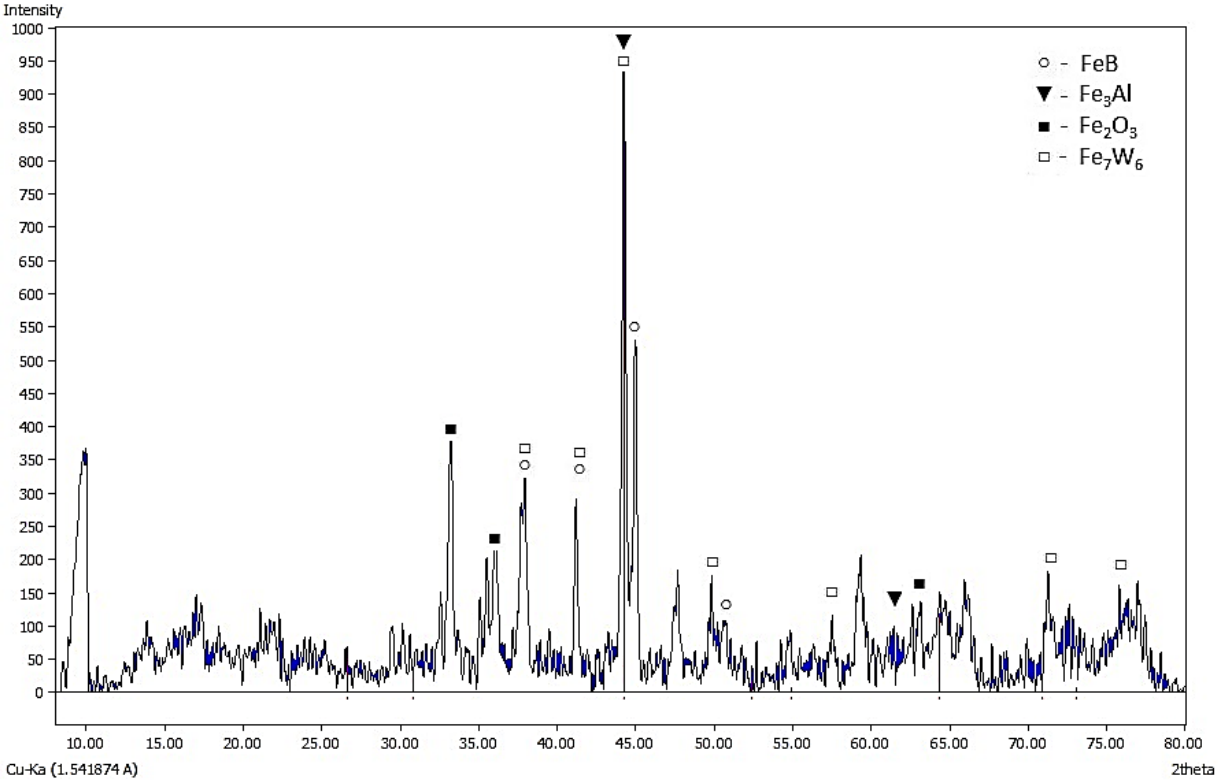


Рис. 9. Дифрактограмма стали 3Х2В8Ф после высокотемпературного диффузионного бороалитирования при 1050°С [11]
Fig. 9. XRD-patterns of 3KH2V3F/3X2B8Ф steel after high temperature diffusion boroaluminizing at 1050°C [11]

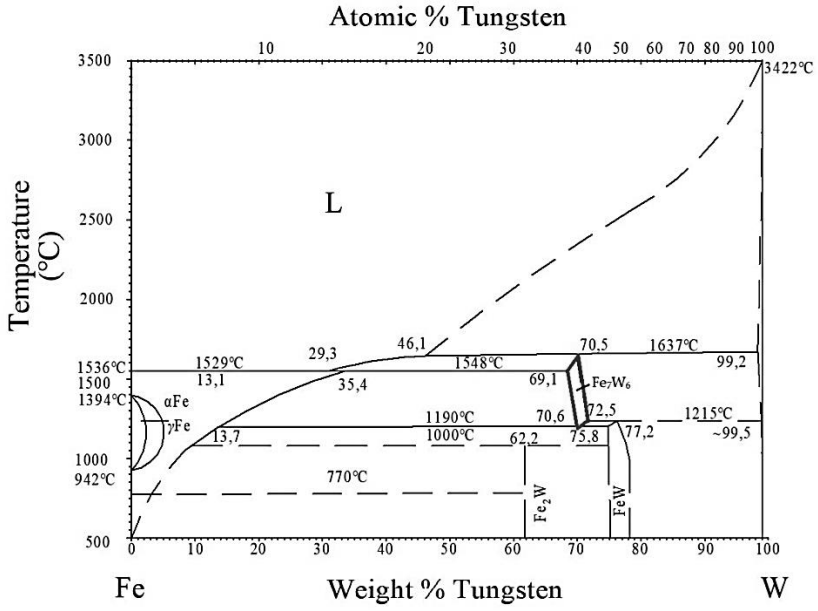


Рис. 10. Диаграмма состояния Fe-W [15]
Fig. 10. Diagram of Fe-W equilibrium [15]

ISSN 1814-3520

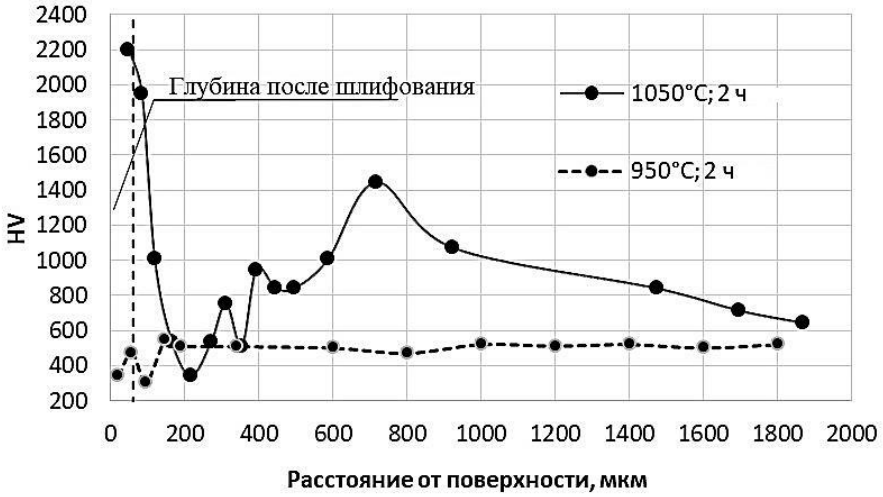


Рис. 11. Распределение микротвердости по глубине [11]
Fig. 11. Microhardness distribution in depth [11]

Второй высокий пик 1400 HV можно отнести к богатой карбидами зоне. Ниже нее значения микротвердости плавно снижаются с 1000 HV до 600 HV. Как правило, профиль микротвердости композитного слоя значительно варьируется и характеризуется резкими чередующимися ростами и спадами значений, что указывает на разнообразие фазового и элементного состава.

Значение микротвердости основного металла после ХТО при 1050°С немного превосходит значение микротвердости после 950°С и составляет 600 HV и 500 HV, соответственно. Полученные значения микротвердости хорошо согласуются с литературными данными, указывающими на 520 HV после вакуумной термообработки [17].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексное решение задач по обеспечению требуемых качественных параметров поверхностного слоя (геометрического, физико-механического и структурного) позволяет сформировать наиболее выгодную модификацию структуры поверхностного слоя, обеспечивающую минимальную шероховатость диффузионных слоев после шлифования, а также формирует требуемые эксплуатационные свойства.

Библиографический список

1. Грешилов А.Д., Шурыгин Ю.Л., Хараев Ю.П. Разработка технологии гибки титановых противоабразивных оковок с применением радиационного нагрева // Ползуновский альманах. 2010. № 1. С. 74–75.
2. Карташов А.А., Белкин А.С., Галкин В.В. Оценка ресурса пластичности тонколистового титанового сплава ОТ4-1 при горячей формовке // Кузнечно-штамповое производство. 2001. № 12. С. 12–16.
3. Никольский Л. А., Зиглин С. З., Бойцов В. В. Горячая штамповка и прессование титановых сплавов. М.: Изд-во Машиностроение, 1975. 280 с.
4. Грешилов А.Д., Даширабданов В.Д., Анчилоев Н.Н, Попов А.Г. Тепловые деформации матрицы при штамповке титановых сплавов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2008. № 4. С. 109–112.
5. Муравьев А.В. Оптимизация нагрева заготовок из титановых сплавов под штамповку // Кузнечно-штамповое производство. 1999. № 1. С. 31–35.
6. Грешилов А.Д., Мандаров Э.Б., Батуев Ц.А. Влияние конструкторско-технологических факторов на процесс горячей листовой штамповки титановых сплавов // Современное машиностроение. Наука и образование. 2018. № 7. С. 537–544. https://doi.org/10.1872/MMF-2018-46
7. Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G. Plasticity of Boronized Layers. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. 369 p. [Электронный ресурс]. URL: https://zh.b-ok.cc/book/2803282/b04e3f (28.02.2019).
8. Mishigdorzhiyn U., Sizov I. The Influence of Boro-aluminizing Temperature on Microstructure and Wear Resistance in Low-Carbon Steels // Materials Performance and Characterization. 2018. Vol. 7. No. 3.

Р. 252–265. https://doi.org/10.1520/MPC20170074
9. Зверев Е.А., Плохов А.В., Чесов Ю.С. Эксплуатационные свойства плазменных покрытий из износостойкого порошкового материала марки ПГ-С27 // Обработка металлов. 2010. № 2. С. 8–12.
10. Чесов Ю.С., Зверев Е.А., Попелюх А.И., Трегубчак П.В. Шероховатость поверхности износостойких покрытий после финишной механической обработки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2011. № 1. С. 12–14.
11. Ulakhanov N.S., Mishigdorzhiyn U.L., Greshilov A.D., Tikhonov A.G., Ryzhikov I.N. Surface Processing Technology in Improving Operational Properties of Hot-Work Tool Steel // Proceedings of the International Conference on Aviamechanical Engineering and Transport. 2019. [Электронный ресурс]. URL: https://www.atlantis-press.com/proceedings/aviaent-19/125924008 (28.02.2019). https://doi.org/10.2991/aviaent-19.2019.67
12. Алиев А.А., Булгаков В.П., Приходько Б.С. Диффузионное борирование стали и шероховатость поверхности // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2005. № 2. С. 91–94.
13. Домбровский Ю.М., Степанов М.С. Создание композитных диффузионных боридных покрытий при микродуговом упрочнении в порошковых средах // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 5. С. 61–63.
14. Шматов А.А. Композиционные структуры, сформированные при диффузионном насыщении стали несколькими переходными металлами // Ползуновский альманах. 2015. № 2. С. 78–84.
15. Predel B. Fe-W (Iron-Tungsten) // Dy-Er – Fr-Mo. ‘Phase Equilibria, Crystallographic and Thermodynamic Data of Binary Alloys’ of Landolt-Börnstein – Group IV Physical Chemistry. 2005. Vol. 5E. P. 1–4. [Электронный ресурс]. URL: https://materials.springer.com/lb/docs/sm_lbs_978-3-540-48786-9_1354 (28.02.2019). https://doi.org/10.1007/b55397
16. Nurbanasari M., Tsakiropoulos P., Palmiere E.J. Solidification Behaviour of a H21 Tool Steel // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1043. P. 159–164. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1043.159
17. Chander S., Chawla V. Characterization and Industrial Performance Evaluation of Duplex-Treated AISI H21 Die // Materials Performance and Characterization. 2019. Vol. 8. No. 1. P. 197–210. https://doi.org/10.1520/MPC20180152

References

1. Greshilov AD, Shurygin YuL, Kharaev YuP. Development of bending technology for anti-abrasive titanium shields using radiation exposure. *Polzunovskij al'manah* = Polzunovsky Almanac. 2010;1:74–75. (In Russ.)
2. Kartashov AA, Belkin AS, Galkin VV. Estimation of thin-sheet titanium alloy OT4-1 plasticity under hot forging. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo* = Forging and Stamping Production. 2001;12:13–16. (In Russ.)
3. Nikolskij LA, Ziglin SZ, Bojcov VV. *Hot die forging and pressing of titanium alloys*. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 280 p. (In Russ.)
4. Greshilov AD, Dashirabdanov VD, Anchiloev NN, Popov AG. Thermal deformations of a die under titanium alloy die stamping. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya* = Basic Problems of Material Science. 2008;4:109–112. (In Russ.)
5. Muravev AV. Heating optimization of titanium alloy blanks for die forging. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo* = Forging and Stamping Production. 1999;1:31–35. (In Russ.)
6. Greshilov AD, Mandarov EB, Batuev CA. Influence of design and technological factors on hot die stamping of titanium alloys. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie* = Modern Engineering. Science and Education. 2018;7:537–544. (In Russ.) https://doi.org/10.1872/MMF-2018-46
7. Krukovich MG, Prusakov BA, Sizov IG. Plasticity of Boronized Layers. Switzerland: Springer International Publishing; 2016, 369 p. Available from: https://zh.b-ok.cc/book/2803282/b04e3f [Accessed 28th February 2019]. https://doi.org/10.1007/b55397
8. Mishigdorzhiyn U, Sizov I. The Influence of Boroaluminizing Temperature on Microstructure and Wear Resistance in Low-Carbon Steels. Materials Performance and Characterization. 2018;7(3):252–265. https://doi.org/10.1520/MPC20170074
9. Chesov YuS, Zverev EA, Plohov AV. Performance properties of plasma coatings from wear-resistant powder material of PG-S27 grade. *Obrabotka metallov* = Metal Working and Material Science. 2010;2:8–12. (In Russ.)
10. Chosov YuS, Zverev EA, Popelyukh AI, Tregubchak PV. Roughness of a surface of wear-resistant plasma coatings after finishing machining. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = Metal Working and Material Science. 2011;1:12–14. (In Russ.)
11. Ulakhanov NS, Mishigdorzhiyn UL, Greshilov AD, Tikhonov AG, Ryzhikov IN. Surface Processing Technology in Improving Operational Properties of Hot-Work Tool Steel. Proceedings of the International Conference on Aviamechanical Engineering and Transport. 2019. Available from: https://www.atlantis-press.com/ proceedings/aviaent-19/125924008 [Accessed 28th February 2019]. https://doi.org/10.2991/ aviaent-19.2019.67
12. Aliev AA, Bulgakov VP, Prihod'ko BS. Diffusive boronizing of steel and surface roughness. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Vestnik of Astrakhan State Technical University. 2005;2:91–94. (In Russ.)
13. Dombrovskij YuM, Stepanov MS. Creation of composite diffusion boride coatings during microarc hardening in powder media. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Izvestia

VSTU. 2015;5:61–63. (In Russ.)
14. Shmatov AA. Composite structures formed in steel at the diffusion saturation by several transition metals. *Polzunovskij al'manah* = Polzunovsky Amanac. 2015;2:78–84. (In Russ.)
15. Predel B. Fe-W (Iron-Tungsten). In: Dy-Er – Fr-Mo. 'Phase Equilibria, Crystallographic and Thermodynamic Data of Binary Alloys' of Landolt-Börnstein – Group IV Physical Chemistry. 2005;5E:1–4. Available from: https://materials.springer.com/lb/docs/sm_lbs_978-3-540-48786-9_1354 [Accessed 28th February 2019]. https://doi.org/10.1007/b55397
16. Nurbanasari M, Tsakiropoulos P, Palmiere EJ. Solidification Behaviour of a H21 Tool Steel. Advanced Materials Research. 2014;1043:159–164. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1043.159
17. Chander S, Chawla V. Characterization and Industrial Performance Evaluation of Duplex-Treated AISI H21 Die. Materials Performance and Characterization. 2019;8(1): 197–210. https://doi.org/10.1520/MPC20180152

Критерии авторства

Улаханов Н.С., Мишигдоржийн У.Л., Грешилов А.Д., Тихонов А.Г. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Ulakhanov N.S., Mishigdorzhiyn U.L., Greshilov A.D., Tikhonov A.G. 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

Улаханов Николай Сергеевич,
старший преподаватель кафедры технологии машиностроения металлообрабатывающих станков и комплексов,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В/1, Россия;
e-mail: nulahanov@mail.ru

Мишигдоржийн Ундрах Лхагвасуренович,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В/1, Россия;
e-mail: druh@mail.ru

Грешилов Анатолий Дмитриевич,
кандидат технических наук, доцент,
декан машиностроительного факультета,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В/1, Россия;
e-mail: agreshilov@mail.ru

Тихонов Александр Геннадьевич,
младший научный сотрудник,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: tihonovalex90@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay S. Ulakhanov,
Senior Lecturer of the Department of Machine-Building Technology of Metalworking Machines and Complexes,
East Siberia State University of Technology and Management
40V/1, Klyuchevskaya St., Ulan-Ude 670013, Russia,
e-mail: nulahanov@mail.ru

Undrakh L. Mishigdorzhiyn,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
East Siberia State University of Technology and Management,
40V/1, Klyuchevskaya St., Ulan-Ude 670013, Russia,
e-mail: druh@mail.ru

Anatoly D. Greshilov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Dean of the Machine-Building Faculty,
East Siberia State University of Technology and Management,
40V/1, Klyuchevskaya St., Ulan-Ude 670013, Russia,
e-mail: agreshilov@mail.ru

Alexander G. Tikhonov,
Junior Researcher,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: tihonovalex90@mail.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 621. 9. 067
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1116-1125

Оптимизация радиуса приведения механизма актуатора для точного позиционирования в автоматическом производстве

© Н.В. Федорещенко
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – показать методику оптимизации механизма точного позиционирования модуля (актуатора для автоматического производства). Конструкция модуля (передача «винт-гайка») позволяет в широких пределах изменять параметры механизма, в т.ч. и радиус приведения. Нахождение наилучшего значения радиуса приведения с позиций быстродействия, т.е. уменьшение времени разгона и торможения, повышение скорости установившегося движения и уменьшение времени пауз дают повышение производительности и эффективности системы в целом. Эта задача для разработчиков является основной как при проектировании новой техники, так и при модернизации. Для оптимизации используется принцип максимума Л.С. Понтрягина. Первоначально выполняется расчет телескопического выдвижного механизма с передачей «винт-гайка» и выбирается двигатель. Затем проводятся исследования механизма, которые позволяют оптимизировать параметры передачи «винт-гайка» с позиции получения максимального коэффициента полезного действия (до 90%), минимального времени разгона и торможения (подбор радиуса приведения передачи). Имеется возможность варьировать тип передачи (качения, скольжения, ролико-винтовая), шаг, угол наклона резьбы и ряд других характеристик. При выборе электродвигателя следует отдавать предпочтение машинам с высокими перегрузочными характеристиками – постоянного тока с возбуждением от магнитов, асинхронным с короткозамкнутым, вентильным ротором. Выполнены расчеты для большой группы модулей автоматического машиностроительного производства. При этом рассматривались различные комбинации параметров актуаторов: грузоподъемность, режимы работы, загрузка, потери в двигателе и ряд др. Итоги исследования – оптимальное передаточное отношение в механизмах зависит от режима отработки заданного перемещения, вид графика скорости перемещения определяется заданными ограничениями фазовых координат и величиной взятого перемещения. Определено также, что при изменении нагрузки в широком диапазоне радиус следует выбирать по номинальному значению нагрузки, а установка между двигателем и винтом редуктора мало влияет на оптимальное значение радиуса приведения. Методика рекомендуется для использования на стадии проектирования при поиске оптимального передаточного устройства в системе электропривода точного позиционирования автоматического производства.

Ключевые слова: модуль – актуатор, передача винт-гайка, быстродействие, принцип максимума, оптимальный радиус приведения, позиционирование

Информация о статье: Дата поступления 16 сентября 2019 г.; дата принятия к печати 19 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2019 г.

Для цитирования: Федорещенко Н.В. Оптимизация радиуса приведения механизма актуатора для точного позиционирования в автоматическом производстве. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 6. С. 1116–1125. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1116-1125

Actuator mechanism reduction radius optimization for precise positioning in automatic production

© Nikolay V. Fedoreshchenko
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to show an optimization method of the mechanism of precise positioning of a module (an actuator for automatic production). The design of the module (feed nut assembly) allows to change mechanism parameters including the drive radius in a wide range. Finding the best value of the reduction radius in terms of speed, i.e. reducing the acceleration and braking time, increasing the speed of steady motion and reducing the pause time improves the performance and efficiency of the system as a whole. This task is a priority for development engineers both in designing new equipment and upgrading. L.S. Pontryagin's maximum principle is used for optimization. Firstly, a telescopic mechanism with a feed nut assembly is calculated and the motor is selected. Then, the mechanism is studied in order to optimize the feed nut assembly parameters in terms of obtaining the maximum efficiency (up to 90%), the min-

imum acceleration and braking time (selection of the drive reduction radius). It is possible to vary the type of transmission (rolling, sliding, roller-screw), pitch, thread angle and a number of other characteristics. When choosing an electric motor, machines with high overload characteristics – direct current with magnetic excitation, induction with a short-circuited valve rotor – are more preferable. Calculations are performed for a large group of modules of automatic machine-building production taking into account various combinations of actuator parameters including load capacity, operating modes, loading, losses in the motor, and a number of others. The study results are as follows: the optimal gear ratio in the mechanisms depends on the processing mode of the given movement, the type of the movement speed graph is determined by the given restrictions of phase coordinates and the value of the specific movement. It is also determined that in the case when the load changes in a wide range the radius should be chosen according to the nominal value of the load, whereas the installation between the motor and the reducer screw has little effect on the optimal value of the reduction radius. The procedure is recommended to be used at the design stage when searching for an optimal transmission device in the electric drive system of precise positioning of automatic production.

Keywords: actuating module, feed nut assembly, speed, maximum principle, optimal reduction radius, positioning

Information about the article: Received September 16, 2019; accepted for publication November 19, 2019; available online December 28, 2019.

For citation: Fedoreshchenko NV. Actuator mechanism reduction radius optimization for precise positioning in automatic production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1116–1125. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1116-1125

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оптимизация автоматизированных электроприводов (АЭП) развивается по двум основным направлениям. В первом проводится повышение эффективности по заданной структурной схеме, элементы системы которой найдены приближенно. Задача улучшения сводится к настройке регулятора на рассчитанные коэффициенты. Второе направление математически более строгое, позволяет определить оптимальную структуру и параметры регулятора. В данной работе показана методика проведения оптимизации механизма точного перемещения для машиностроительного автоматического производства. Приведение в движение механизма осуществляется с помощью регулируемого электропривода. Современные электроприводы представляют собой сложные электромеханические системы, состоящие в первом приближении из объекта управления и регулятора. В состав первого входят управляемый преобразователь, электродвигатель, исполнительный механизм[1,2]. Задача второго (регулятора) заключается в том, что он должен препятствовать любому отклонению параметров объекта управления от заданного состояния. И эта задача должна решаться как для управляющих, так и для возмущающих воздействий во всем диапазоне их изменения. Этого (быстродействия и точности) требует технология транспортировки[3] [1–10].

2. МЕТОДЫ

Для оптимизации АЭП используются классические методы оптимизации, согласно которым задается функционал, отражающий требования к системе. При разработке электромеханических систем (в т.ч. и ЭП) находят применение различные методы оптимизации. Наиболее часто встречаются принцип максимума Л.С. Понтрягина, оптимизация по критерию обобщенной работы А.А. Красовского, метод агрегированных макропеременных А.А. Колесникова, асимптотическая магистральная оптимизация А.И. и В.И. Панасюк и некоторые др. [3–6].

В общем случае метод оптимизации Понтрягина Л.С. применим как для нелинейных систем, так и для линейных относительно управлений и фазовых координат при ограниченных управлениях. Имеется возможность его применения и для линейных систем только касательно управлений, но не фазовых координат при ограниченных управлениях [4, 5]. Возможен и поиск оптимальных характеристик и параметров динамических систем. Рассматриваются управляемые процессы, описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями. Максимальный порядок этих

уравнений не ограничивается, но с его увеличением возрастает трудоемкость вычислений. Допустимые оптимальные управления могут претерпевать разрывы первого рода в конечном числе моментов времени. Бесконечное число переключений считается недопустимым, возможно приближение к этому – скользящий режим. Управляющее воздействие ограничено, вследствие этого не любая точка фазового пространства достижима. Возможно использование скалярных и векторных критериев оптимальности, но наиболее широко этот метод используется при синтезе параметров систем и оптимальных управлений ими в задачах максимального быстродействия [5–9]. Метод не дает непосредственного решения задачи оптимизации регулятора, а сводит ее к стандартной задаче решения дифференциальных уравнений в $(2n + r + 2)$-мерном пространстве, где: n – порядок исходной системы уравнений; r – количество уравнений. Этот недостаток, т.е. трудность решения краевой задачи в сопряженном пространстве, является основным препятствием в применении этого метода[3].

Анализ достоинств и недостатков рассмотренных методов оптимизации позволяет сделать вывод, что принцип максимума Л.С. Понтрягина имеет ряд преимуществ (математическая точность, универсальность, неограниченность), что и стало определяющим при выборе его в качестве основного метода оптимизации параметров механизма актуатора – телескопического транспортирующего устройства (ТТУ) в данной работе.

Далее для проведения оптимизации определяется математическое описание объекта, накладываются физические ограничения, и определяется управляющее воздействие, доставляющее экстремальное значение исходному функционалу[3] [4, 5]. Одним из основных технологических параметров, реализуемых системой «электропривод – рабочая машина» (ЭП-РМ), является производительность всего агрегата. Для систем позиционирования (роботы-манипуляторы, приводы подачи станков, краны, лифты), задача которых осуществлять перемещение людей, грузов, деталей и инструментов, повышение производительности возможно за счет оптимизации цикла транспортировки. Другими словами, уменьшение времени разгона и торможения, повышение скорости установившегося движения и сокращение времени пауз дают подъем производительности и эффективности системы ЭП-РМ. И эта задача для разработчиков является основной как при проектировании новой техники, так и при модернизации существующего оборудования [5, 8–16]. Следует сразу отметить, что процесс минимизации не может продолжаться до нуля, т.к. все элементы, входящие в систему ЭП-РМ, имеют физические ограничения по допустимым характеристикам: скорости, ускорению, максимальному моменту[3] [7, 17, 18]. Технологический процесс также накладывает ограничения на временные промежутки цикла перемещения, например, на время паузы задает системе управления (СУ) не менее важный параметр – точность позиционирования [1, 8, 15]. Решить поставленные задачи возможно двумя путями. Первый – разработать СУ, которая оптимизирует статические и динамические режимы заданной системы позиционирования (СП) по критериям «точность» и «быстродействие» с учетом ограничений всех составных элементов системы. Второй путь – это оптимизация характеристик элементов системы ЭП (электродвигатель, рабочий машина, передаточное устройство) по заданным критериям, а затем уже разработка оптимальной СУ. Первый путь – классическое решение задачи. Он дает близкий к оптимальному результат, но учитывая, что не все элементы системы оптимальны по своим характеристи-

[1]А.с. № 1527136 B66C 23/68. Телескопическое устройство грузоподъемного механизма / В.П. Кольцов, А.Н. Лобанов, Н.В. Федорещенко, В.В. Швыдкий (СССР). Заявл. 11.07.1987; опубл. 07.12.1989. Бюл. № 45.
[2]А.с. № 1557084 B66C 23/68. Телескопическая стрела / В.П. Кольцов, А.Н. Лобанов, Н.В. Федорещенко (СССР). Заявл. 12.01.1988; опубл. 15.04.1990. Бюл. № 14.
[3]Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления. М.: Наука, 1987. 712 с.

кам (например, передаточное устройство), то такую систему следует классифицировать как оптимизированную, т.е. близкую к оптимальной. Второй путь является более перспективным для получения устройств позиционирования, востребованных современным автоматическим производством[3] [5, 13, 14].

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим процесс разработки оптимальной по быстродействию СП по второму пути. Выделим несколько основных этапов проведения такой оптимизации [7, 14]. На первом этапе зададимся группой механизмов СП, для которых будем решать задачу оптимизации. Такое выделение целесообразно, т.к. класс СП очень широкий, а, значит, и велик спектр требований как к механизмам, так и к СУ. Остановимся на роботах-манипуляторах (РМ), основная задача которых – перемещение заготовок, деталей и инструмента в автоматическом производстве. Следует также определиться с конструкцией РМ. В настоящее время просматривается тенденция конструирования РМ из отдельных блоков или модулей для каждой степени подвижности. Такие элементы называются «актуаторами» (преобразователи вращательного движения в поступательное), они широко применяются при автоматизации технологических процессов [7, 10, 12]. В качестве базовой конструкции примем актуатор[1,2], который состоит из телескопических выдвижных секций, механизма их выдвижения в виде передачи винт-гайка (ПВГ) и ЭП с СУ [7, 8]. Проведем краткий анализ такого актуатора с позиции решения задачи оптимизации по следующим критериям: быстродействие и точность. К достоинствам такой конструкции механизма следует отнести:

– высокую точность изготовления и жесткость конструкции;

– широкие диапазоны изменения скоростей и ускорений ПВГ;

– возможность варьирования параметрами механизма для получения оптимальных характеристик, например, радиуса приведения;

– разнообразие конструкций (разные виды ПВГ, изменяемые при проектировании параметры этих передач)[1,2];

– практически неограниченный диапазон мощностей (грузоподъемностей).

Из недостатков такого актуатора следует отметить сложность его изготовления и относительно высокую стоимость. Выбор и оптимизация передаточного числа редуктора или радиуса приведения механизма актуатора в общем случае производятся из условий обеспечения:

– быстрого разгона рабочего органа с минимальным моментом;

– минимального момента инерции;

– требуемой точности и плавности движения;

– минимальных габаритов механизма.

Неправильный выбор радиуса приведения может существенно снизить не только производительность всего механизма, но и эффективность оптимального управления электроприводом, т.к. от радиуса приведения зависят электромеханическая постоянная времени и постоянная звена интегрирования на выходе структурной схемы. В то же время известно, что для оптимальных электромеханических систем необходимо показать соответствие данного радиуса приведения заданному критерию оптимальности системы и ее граничным условиям [1, 2, 9, 11].

4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ И ДОПУЩЕНИЯ

Исходными данными для проектирования принятого актуатора являются параметры из технического задания, которое разрабатывает проектировщик совместно с заказчиком. Первоначально выполняется расчет телескопического выдвижного механизма с передачей винт-гайка и выбирается двигатель. Затем проводятся исследования механизма, которые позволяют оптимизировать параметры этой передачи с позиций получения максимального коэффициента полезного действия (до 90%),

минимального времени разгона и торможения (подбор радиуса приведения передачи). Возможно варьировать тип передачи (качения, скольжения, ролико-винтовая), шаг, угол наклона резьбы и ряд других характеристик. При выборе электродвигателя следует отдавать предпочтение машинам с высокими перегрузочными характеристиками постоянного тока с возбуждением от магнитов, асинхронным с короткозамкнутым ротором, вентильным машинам [7, 8]. В общем виде задачу оптимизации i – коэффициента передаточного числа или R – радиуса приведения можно сформулировать следующим образом: при заданном времени t найти i или R передаточного механизма, которые позволяют минимизировать момент, развиваемый двигателем в переходные режимы. Кроме этого, необходимо свести к минимуму и скорость его изменения dM/dt или, то же самое, скорость изменения тока dI/dt в якорной (статорной) цепи электрической машины [2, 13]. Определение оптимальных соотношений $R_{опт.}$ или $i_{опт.}$ ведет к уменьшению установленного габарита двигателя, что особенно ценно в практике проектирования ЭП. Для роботов, у которых время выполнения технологических операций заранее задано, минимальный габарит двигателя оказывается предпочтительным при разработке их конструкций. Кроме того, при переходных процессах (например, в двигателе постоянного тока) коммутирующий поток, создаваемый дополнительными полюсами, отстает от потока, создаваемого реактивной ЭДС, тем больше, чем значительнее величина dI/dt [1, 3]. Следовательно, снижение уровня допускаемой скорости изменения тока улучшает коммутацию и тем самым увеличивает срок службы электродвигателя. Нельзя не отметить, что скорость нарастания тока якорной цепи dI/dt является одним из определяющих параметров при выборе силовых элементов тиристорных или транзисторных преобразователей, и снижение dI/dt упрощает задачу при выборе преобразователя [5, 8]. Примем следующие допущения:

– доказано, что для данной системы уравнений существует управление, принадлежащее к гладким кусочно-непрерывным функциям с разрывами первого рода [2, 9];

– найденное оптимальное управление является единственным реализуемым на современной элементной базе [12];

– двигатель недоиспользован по нагреву, магнитный поток его постоянен, вихревыми токами и реакцией якоря пренебрегаем;

– упругость механической передачи не учитывается, люфт отсутствует;

– КПД механической передачи принимаем равным единице;

– оптимизируется система с нулевыми начальными условиями, т.е. система позиционирования.

5. ОПТИМИЗАЦИЯ

В настоящее время известно множество различных методов оптимизации динамических систем. Под «оптимизацией» по заданному критерию будем подразумевать как нахождение наилучшего управляющего воздействия на систему, так и наиболее приемлемые параметры объекта оптимизации. Следует сразу отметить, что не существует универсального метода, который бы в полной мере решал задачу оптимизации любого объекта. Все эти способы применимы только для вполне определенного класса или группы объектов[3] [4]. Краткая характеристика исследуемого объекта ТТУ:

– линейный;

– математическое описание в виде одно- и двухмассовой электромеханической системы с изменяющимися в известном диапазоне жесткостью механической передачи и моментом сопротивления;

– порядок системы уравнений до шестого и выше;

– нестационарные параметры в конкретный момент времени невозможно определить прямым путем;

– высокие требования по быстродействию и точности позиционирования.

Решим эту задачу, используя прин-

цип максимума Л.С. Понтрягина[3] [4]. Этот метод позволит получить выражения радиуса приведения для различных конструкций, видов передаточных механизмов, а также для разнообразных ограничений и начальных условий. Определение оптимального радиуса приведения по методу Л.С. Понтрягина заключается в нахождении такого значения параметра *R* (радиуса приведения) из множества допустимых его значений, которое остается постоянным во время всего движения. Одновременно находится такое уравнение, которое удовлетворяет решению краевой задачи и дает минимальное значение времени движения – критерий «быстродействие» [2]. Фактически решается типовая задача оптимального уравнения, но введение радиуса приведения как оптимизируемого параметра дает дополнительное условие. Исходными данными для решения являются:

– масса груза и механизма – *m*;

– максимальный (пусковой) момент двигателя – *M*;

– тип двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов;

– критерий оптимизации – «быстродействие»;

– статическое усилие от действия груза – F_c.

Требуется определить передаточное отношение (радиус приведения), при котором моменты времени разгона и торможения механизма будут минимальны. Уравнения движения механизма запишем следующим образом (1):

$$\begin{cases} \Delta\dot{S} = V_{мех.} \\ \dot{V}_{мех.} = \left(\dfrac{M_д}{R} - F_c\right) / \left(\dfrac{I_д}{R} + m_\Sigma\right), \end{cases} \quad (1)$$

где $\Delta S = S_0 - S$; S_0 – заданное перемещение; S – действительное положение механизма; $V_{мех.}$ – скорость перемещения механизма; $M_д$ – момент двигателя; F_c – статическое усилие от действия груза и механизма; $I_д$ – момент инерции двигателя и винта; m_Σ – масса груза и механизма; $R = V_{мех.} / W_д$ – радиус приведения переменных к оси механизма.

Точкой над переменными *V* и *S* обозначена операция дифференцирования. Приведение скоростей и моментов выполнено к валу механизма. При учете потерь к данной системе уравнений добавляется уравнение тока (2):

$$\dot{I}_я = M_д{}^2. \quad (2)$$

Согласно [1, 2, 7], для этой системы оптимальный радиус приведения механизма актуатора может быть найден из уравнения (3):

$$R^4 - R^2\left[\frac{m_\Sigma}{J_д} + 3\left(\frac{F_c}{M_{мах}}\right)^2\right] - \frac{m_\Sigma}{J_\Sigma}\left(\frac{F_c}{M_{мах}}\right)^2 = 0 \quad (3)$$

при управлении двигателем по цепи якоря без учета потерь мощности, а также из уравнения (4):

$$R^4 - 2R^2\frac{F_c}{M_{мах}} - R^2\left[\frac{m_\Sigma}{J_д} + 2\left(\frac{F_c}{M_{мах}}\right)^2\right] + \\ +2R\cdot\frac{F_c m_\Sigma}{M_{мах} J_д} - 4\left(\frac{m_\Sigma}{J_д}\right)\cdot\left(\frac{F_c}{M_{мах}}\right) = 0 \quad (4)$$

при учете потерь мощности. Следует добавить, что управляющим воздействием в исследуемой системе является момент двигателя *M*, который меняет знаки только один раз, а начало движения происходит при $M_д = M_{max}$. Решения этих уравнений являются искомыми значениями оптимальных радиусов приведения для серии актуаторов. Результаты расчетов сведены в таблицу, где они сопоставляются с эмпирическими значениями радиуса приведения, полученными ранее при ручном расчете (без оптимизации) фрагмента линейки грузоподъемности модулей ТТУ.

Оптимальные радиусы приведения при различных режимах
Optimal reduction radii at various modes

Модуль-актуатор (грузоподъемность в кг, режим/ продолжительность включения)	Радиус приведения – $R \cdot 0{,}001$ м						
	Ручной расчет без оптимизации, потери учитываются	Оптимальный расчет при различных условиях					
		Потери не учитываются	Потери учитываются	Потери не учитываются	Потери учитываются	Потери не учитываются КПД = 0,7	Потери не учитываются, КПД = 0,5
	момент номинальный			момент максимальный		момент номинальный	
ТТУ – 20 кг (легкий/15)	3,8	1,9	1,5	3,3	2,8	1,2	0,8
ТТУ – 40 (средний/60)	3,8	1,3	0,9	2,1	1,7	0,7	0,5
ТТУ – 63 (средний/15)	3,8	1,4	1,1	1,6	1,3	0,9	0,6
ТТУ – 80 (тяжелый/40)	3,8	1,2	0,9	5,0	4,3	0,8	0,5
ТТУ – 100 (очень тяжелый /60)	3,8	2,3	1,9	3,8	3,4	1,6	1,2
ТТУ – 200 (легкий/15)	0,96	2,5	2,1	0,6	0,4	1,8	1,2
ТТУ – 400 (средний/60)	0,96	2,4	1,7	2,0	1,4	1,3	0,8
ТТУ – 630 (средний/15)	1,3	1,7	1,1	2,1	1,6	0,8	0,5
ТТУ – 800 (тяжелый/40)	1,6	1,3	0,9	6,2	4,1	0,6	0,4
ТТУ – 1000 (очень тяжелый/60)	5,0	1,8	1,2	1,0	0,6	0,9	0,6
ТТУ – 2000 (легкий/15)	3,2	2,6	1,7	1,9	1,4	1,2	0,8

6. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При расчетах (см. таблицу) варьировались следующие параметры: предельные моменты двигателя (номинальный и пусковой), КПД, режимы загрузки и продолжительность включения механизма. Анализ полученных оптимальных радиусов приведения ТТУ (близких по режимам работы) показал компактность их расположения в зависимости от степени загрузки механизма (разброс незначительный). Как для номинального момента, так и для максимального аналитически зависимость $R = f\left(F / M_{\partial}\right)$ выражается формулой: $R = 0.30 M_{\partial} / F$.

Различные условия эксплуатации, потери в двигателях, КПД, величина базового момента двигателя слабо влияют на характер оптимального радиуса приведения. Полученная зависимость может быть рекомендована для предварительных расчетов механизмов ТТУ с передачами винт-гайка скольжения различных модификаций. Рассмотрим, как изменяется длительность переходного процесса при вынужденном изменении радиуса приведения в ту или иную сторону от его оптимального значения. Такая задача ставится в связи с необходимостью удовлетворения таких требований как соответствие скоростей движения двигателя и груза, обеспечение работоспособности электропривода при изменении величины груза, сохранение допустимого режима нагрева обмоток двигателя. Для ТТУ по эмпирическим формулам, изложенным в [1, 3], были рассчитаны длительность отработки перемещений при изменении радиуса приведения механизма от 0 до 2,5 значений оптимального и при номинальной величине груза. При изменении радиуса приведения от (1,45 до 2,75) · 10^{-3} м (отработка перемещения по трапецеидальному закону изменения скорости) изменение времени перемещения не превышает 5% от значения при оптимальном радиусе приведения. Диапазон изменения радиуса приведения при этом составляет +31%. Пятипроцентное отклонение вполне приемлемо при предварительном расчете[3] [12, 17]. Дальнейшее увеличение R ведет к существенному изменению формы кривой скорости перемещения – появляется второй отрезок разгона с установившейся скоростью, значительно меньшей по величине, чем скорость (номинальная или максимальная) при оптимальном разгоне (трапецеидальный график). Увеличение радиуса приведения выше значения 1,75 · 10^{-3} м приводит к изменению формы кривой торможения при отработке заданного перемещения. Фактически трапецеидальный график изменения скорости перемещения вырождается в треугольный, что увеличивает длительность отработки перемещения в целом. При радиусах приведения более R = 4,7 · 10^{-3} м время переходного процесса устремляется к бесконечности.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги проведенному исследованию, следует отметить следующее:

– оптимальное передаточное отношение в механизмах ТТУ зависит от режима отработки заданного перемещения (треугольный или трапецеидальный график изменения скорости перемещения);

– вид графика скорости перемещения определяется заданными ограничениями фазовых координат и величиной заданного перемещения;

– при изменении нагрузки в диапазоне от минимальной (отличной от холостого хода) до номинальной для обеспечения минимальной длительности отработки перемещений следует $R_{опт}$ выбирать по номинальному значению нагрузки;

– для режима холостого хода ТТУ и близкого к нему оптимальное значение радиуса приведения можно определить по (5):

$$R_{опт} = \sqrt{J_{\Sigma} / m_{ттy}}; \qquad (5)$$

– установка в ТТУ между двигателем и винтом передачи винт-гайка редуктора для согласования скоростей мало влияет на оптимальное значение радиуса приведения, только при уменьшении суммарного момента инерции получено существенное уменьшение оптимального радиуса (в 3 раза при уменьшении в 10 раз);

– изменение загрузки ТТУ от 0 до номинального значения ведет к увеличению $R_{опт}$ от 2 до 5 раз, большее увеличение соответствует повышенной грузоподъемности.

Следует отметить, что в ряде случаев оптимальное значение не может быть реализовано, но при возможности его варьирования (на этапе проектирования) следует стремиться к оптимальному значению. Разработанная методика, полученные аналитические зависимости и расчеты

предназначены для определения наилучших значений параметров ТТУ при проектировании, когда проводится оптимизация по критерию «быстродействие».

Библиографический список

1. Акимов Л.В., Рохлин Л.И. Оптимальные радиусы приведения механической части быстродействующих электроприводов постоянного тока с ограничениями фазовых координат // Известия ВУЗов СССР. Электромеханика. 1985. № 9. С. 104–·112.
2. Ильин О.П., Галкин А.Л. О выборе оптимального передаточного числа редуктора приводов позиционных механизмов // Электричество. 1973. № 4. С. 83–85.
3. Пышкало В.Д., Акимов А.В., Шамрай В.П. Оптимальные по быстродействию промышленные электроприводы. М.: Энергия, 1967. 104 с.
4. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. Изд. 4-е, стер. М.: Наука, 1983. 393 с.
5. Клюев А.С., Колесников А.А. Оптимизация автоматических систем управления по быстродействию. М.: Энергоатомиздат, 1982. 240 с.
6. Панасюк В.И., Панасюк А.И. Асимптотическая магистральная оптимизация управляемых систем. Минск: Наука и техника, 1986. 317 с.
7. Болотова В.А., Федорещенко Н.В., Машукова Н.И. Проектирование актуаторов для систем позиционирования // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием: в 2 т. (г. Иркутск, 21–25 апреля 2015 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. Т. 1. С. 159–162.
8. Федорещенко Н.В. Модернизация промышленных электроприводов. // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием: в 2 т. (г. Иркутск, 18 февраля 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017. Т. 1. С. 117–119.
9. Ловчаков В.И. Необходимые условия максимального быстродействия линейных динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 6. С. 376–382. https://doi.org/10.17587/mau.18.376-382
10. Даньшина А.А., Пятибратов Г.Я. Многофакторный выбор электромеханического модуля для сбалансированного манипулятора // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2016. Т. 16. № 3. С. 23–31. https://doi.org/10.14529/power160303
11. Пятибратов Г.Я. Условия оптимизации и эффективность демпфирования электроприводом колебаний упругих механизмов // Электротехника. 2015. № 7. С. 9–15.
12. Сухенко Н.А., Пятибратов Г.Я., Даньшина А.А. Перспективные электромеханические системы управления усилиями промышленных манипуляторов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 5. С. 76–81. http://dx.doi.org/10.17213/0136-3360-2015-5-76-81
13. Крейнин Г.В., Мисюрин С.Ю. К выбору типа привода силового блока мехатронной системы // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 4. С. 3–11.
14. Хижняков Ю.Н., Южаков А.А., Безукладников И.И., Трушников Д.Н. Адаптивное нечеткое управление следящих электромеханических систем // Электротехника. 2018. № 11. С. 32–35.
15. Pyatibratov G.Ya. Conditions of Optimization and Efficiency of Damping of Oscillations of Elastic Mechanisms by an Electric Drive // Russian Electrical Engineering. 2015. Vol. 86. No. 7. P. 373–378.
16. Pyatibratov G.Y., Bekin A.B. Synthesis of an Object Moving Control System with Flexible Suspension under the Action of External Forces. Procedia Engineering. 2015. Vol. 129. P. 29–36. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.004
17. Pyatibratov G.Y., Bogdanov D.Y., Bekin A.B. Retrofit simulator to train cosmonauts for working in non-gravity and reduced gravity environment. Procedia Engineering. 2015. Vol. 129. P. 42–50. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.006
18. Bogdanov D.Yu., Pyatibratov G.Ya., Bekin A.B. System Implementation of Speed Restriction While Developing the Force Compensation Systems // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P. 1032–1040. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.210

References

1. Akimov LV, Rohlin LI. Optimal reduction radii of the mechanical part of high-speed direct current electric drives with phase coordinate restrictions. *Izvestiya VUZov SSSR. Elektromehanika* = Russian Electromechanics. 1985;9:104–112. (In Russ.)
2. Il'in OP, Galkin AL. To selection of optimal gear ratio of a positional mechanism drive gearbox. *Elektrichestvo* = Electricity. 1973;4:83–85. (In Russ.)
3. Pyshkalo VD, Akimov AV, Shamraj VP. *Optimum speed industrial electric drives*. Moscow: Energiya; 1967, 104 p. (In Russ.)
4. Pontryagin LS, Boltyanskij VG, Gamkrelidze RV, Mishchenko EF. A *mathematical theory of optimal processes*. Moscow: Nauka; 1983, 393 p. (In Russ.)
5. Klyuev AS, Kolesnikov AA. *Speed optimization of automatic control systems*. Moscow: Energoatomizdat; 1982, 240 p. (In Russ.)
6. Panasyuk VI, Panasyuk AI. *Asymptotic trunk optimization of controlled systems*. Minsk: Nauka i tehnika; 1986, 317 p. (In Russ.)

7. Bolotova VA, Fedoreshchenko NV, Mashukova NI. Designing actuators for positioning systems. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of All-Russian scientific and technical conference with international participation. 21–25 April 2015, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2015, vol. 1, p. 159–162. (In Russ.)
8. Fedoreshchenko NV. Modernization of industrial electric drives. Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of All-Russian scientific and technical conference with international participation. 18 February 2017, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National research Technical University; 2015, vol. 1, p. 117–119. (In Russ.)
9. Lovchakov VI. Necessary conditions of time-optimality of linear dynamical systems. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* = Mechatronics, Automation, Control. 2017;18(6):376–382. (In Russ.) https://doi.org/10.17587/mau.18.376-382
10. Danshina AA, Pyatibratov GYa. Multifactorial determination of electromechanical module for prospective balanced manipulator. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* = Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering. 2016;16(3):23–
31. (In Russ.) https://doi.org/10.14529/power160303
11. Pyatibratov GYa. Optimization conditions and electric drive damping efficiency of elastic mechanism oscillations. *Elektrotekhnika* = Electrical Engineering. 2015;7:9–15. (In Russ.)
12. Sukhenko NA, Pyatibratov GYa, Danshina AA. Perspective electromechanical control systems of industrial manipulator efforts. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika* = Russian Electromechanics. 2014;5:76–81. http://dx.doi.org/10.17213/0136-3360-2015-5-76-81
13. Kreinin GV, Misyurin SY. On choosing the drive type for the power unit of a mechatronics system. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* = Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015;4:3–11. (In Russ.)
14. Khizhniakov YuN, Yuzhakov AA, Bezukladnikov II, Trushnikov DN. Adaptive fuzzy control of the tracking electromechanical systems. *Elektrotehnika* = Electrical Engineering. 2018;11:32–35. (In Russ.)
15. Pyatibratov GYa. Conditions of Optimization and Efficiency of Damping of Oscillations of Elastic Mechanisms by an Electric Drive. Russian Electrical Engineering. 2015;86(7):373–378.
16. Pyatibratov GY, Bogdanov DY, Bekin AB. Synthesis of an Object Moving Control System with Flexible Suspension under the Action of External Forces. Procedia Engineering. 2015; 129:29–36. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.004
17. Pyatibratov GY, Bogdanov DY, Bekin AB. Retrofit simulator to train cosmonauts for working in non-gravity and reduced gravity environment. Procedia Engineering. 2015;129: 42–50. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.006
18. Bogdanov DYu, Pyatibratov GYa, Bekin AB. System Implementation of Speed Restriction While Developing the Force Compensation Systems. Procedia Engineering. 2016;150:1032–1040. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.210

Критерии авторства

Федорещенко Н.В. получил и оформил научные результаты и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Authorship criteria

Fedoreshchenko N.V. 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

Федорещенко Николай Васильевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры электропривода
и электрического транспорта,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: n-fed38@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Nikolay V. Fedoreshchenko,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Electric Drive and Electric Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: n-fed38@mail.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.311
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1126-1135

Автоматизация проектирования турбогенераторов

© Г.Г. Константинов, С.Б. Ахмедов
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – автоматизация наиболее сложных и значительных по времени расчетов при проектировании турбогенераторов с любым числом полюсов и различными системами охлаждения; сокращение времени расчетов и повышение их точности. Опережающий рост энергетики в России и в развитых странах мира обеспечивается за счет возведения тепловых и атомных электростанций, оснащенных современными мощными турбогенераторами, являющимися сложными электрическими машинами, при изготовлении которых постоянно находят применение последние достижения науки и техники. Поэтому ученые, специалисты ищут и разрабатывают новые методы и решения по улучшению характеристик и конструкций турбогенераторов. В данной работе представлены методика, алгоритмы и разработанные программы, позволяющие автоматически выполнять наиболее сложные и значительные по времени расчеты при проектировании турбогенераторов с любым числом полюсов, с косвенным и непосредственным охлаждением всех типов турбогенераторов, применяемых на тепловых и атомных электростанциях. Алгоритм электромагнитного расчета предполагает расчет магнитной цепи турбогенератора на пару полюсов с использованием применяемых современных марок сталей для изготовления магнитопроводов статора и ротора. Вычисления выполнены с помощью программы Microsoft Excel. Достоинством данной методики, алгоритмов и программы является не только автоматизация расчетов, но и автоматическое построение графиков характеристик холостого хода и коэффициента полезного действия, удобный и понятный интерфейс, которым без затруднений могут пользоваться проектировщики.

Ключевые слова: автоматизация проектирования, программа, турбогенератор, характеристики холостого хода и коэффициента полезного действия

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

Для цитирования: Константинов Г.Г., Ахмедов С.Б. Автоматизация проектирования турбогенераторов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 6. С. 1126–1135. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1126-1135

Automation of turbogenerator design

Gennadiy G. Konstantinov, Sardor B. Akhmedov
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to automate the most complex and time-consuming calculations when designing turbogenerators with any number of poles and various cooling systems as well as to reduce the calculation time and improve calculation accuracy. The rapid growth of the energy sector in Russia and in the developed countries of the world is ensured by the construction of thermal and nuclear power plants equipped with modern powerful turbine generators, which are complex electric machines manufactured with the use of the latest achievements of science and technology. Therefore, scientists and specialists are developing and looking for the new methods and solutions in order to improve the characteristics and designs of turbogenerators. This paper presents the methodology, algorithms and developed programs that allow automated performance of the most complex and time-consuming calculations when designing turbogenerators with any number of poles, with indirect and direct cooling of all types of turbogenerators used in thermal and nuclear power plants. The electromagnetic calculation algorithm involves the calculation of the magnetic circuit of a turbogenerator for a pair of poles with the use of modern grades of steel for stator and rotor magnetic circuit manufacture. The calculations are performed using the Microsoft Excel program. The advantage of this methodology, algorithms and program are as follows: automation of calculations, automatic construction of graphs of idling and efficiency characteristics, convenient and intuitive interface that designers can use without any difficulty.

Keywords: design automation, program, turbine generator, idling and efficiency characteristics

Information about the article: Received May 21, 2019; accepted for publication November 26, 2019; available online December 28, 2019.

For citation: Konstantinov GG, Akhmedov SB. Automation of turbogenerator design. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):1126–1135. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1126-1135

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие России предусматривает опережающий рост энергетики главным образом за счет возведения тепловых и атомных электростанций, оснащенных современными мощными турбогенераторами [1–3], вырабатывающими около 70% всей электрической энергии. Поэтому ученые, специалисты создают новые методы и решения для улучшения характеристик и конструкций турбогенераторов [4, 5], представляющих собой сложные электрические машины, при проектировании которых постоянно находят применение последние достижения науки и техники [6, 7].

Турбогенераторы предназначены для непосредственного соединения с паровыми или газовыми турбинами. В России турбогенераторы изготавливаются в двух- и четырехполюсном исполнении с частотой вращения 3000 или 1500 *об/мин* [8].

Прогресс в развитии вычислительной техники, появление современных компьютерных технологий позволяют автоматизировать наиболее трудоемкие этапы проектирования электрических машин. При этом особенно актуальными задачами при автоматизации являются наиболее сложные и значительные по времени электромагнитные расчеты и вычисления характеристик турбогенераторов, которые связаны с данными больших таблиц и построением графических зависимостей [9–11].

В настоящей работе предлагаются методика, алгоритмы и программы расчетов на примере наиболее распространенных турбогенераторов с различными способами охлаждения и с любым числом полюсов:

– с косвенным охлаждением воздухом и водородом сердечника и обмоток статора и ротора типа Т2, Т3Ф, ТВ;

– с непосредственным охлаждением водой обмотки статора и водородом обмотки ротора, с косвенным охлаждением водородом сердечника статора типа ТВВ, а также с непосредственным охлаждением водой сердечника статора, обмотки статора и обмотки ротора типа Т3В.

В электромагнитный расчет турбогенераторов входит расчет магнитной цепи, рассчитываемой в режиме холостого хода. Целью расчета магнитной цепи является определение величины магнитодвижущей силы (МДС) обмотки возбуждения, необходимой для создания магнитного потока, обеспечивающего заданную электродвижущую силу (ЭДС). В статье в качестве примера приведен расчет двухполюсного турбогенератора с косвенным водородным охлаждением типа ТВ мощностью *32 000 кВт*, напряжением *10 кВ*.

2. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Расчет магнитной цепи ведется на пару полюсов и выполняется по следующему алгоритму[1] [12–16]:

– исходные данные для работы программы приведены в табл. 1, представляющие основные размеры турбогенераторов, геометрические размеры пазов, количество зубцов статора и ротора, которые известны из предыдущих расчетов;

– далее эти параметры используются в программе для расчета магнитной цепи;

– выбираются марки сталей для изготовления магнитопроводов статора и ротора;

– выполняется в программе расчет магнитной цепи для номинальной величины *ЭДС;*

[1]Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612976. Автоматизация расчета характеристик холостого хода для турбогенераторов с разными типами охлаждения / Г.Г. Константинов, М.А. Чекан. Правообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. Заявл. 09.01.2018; опубл. 01.03.2018.

Таблица 1

Исходные данные для расчета магнитной цепи

Table 1

Initial data for magnetic circuit calculation

Обозначения основных величин и их численные значения							
D_0	0,0814 м	b_p	$6 \cdot 10^{-3}$ м	$k_{\delta Z}$	1,074	Σb_{n2}	$242,3 \cdot 10^{-3}$ м
D_1	0,876 м	t_p	$28 \cdot 10^{-3}$ м	$k_{\delta в}$	1,01	$S_{Z(0,7)}$	1,583 м^2
D_2	0,814 м	$k_{\delta л}$	1	$k_{\delta р}$	1,008	$S_{Z(0,2)}$	1,154 м^2
l_1	3,12 м	h_{n1}	$163,9 \cdot 10^{-3}$ м	$k_{\delta п}$	1	λ_2	$0,285 \cdot 10^{-5}$ м
l_2	3,22 м	h_{n2}	$133,3 \cdot 10^{-3}$ м	$k_{\delta с}$	1,016	$b_{Z(0,7)}$	$26,276 \cdot 10^{-3}$ м
δ	$31,5 \cdot 10^{-3}$ м	Z_1	42	$k_{\delta \gamma}$	1,041	$b_{Z(0,2)}$	$16,312 \cdot 10^{-3}$ м
K_j	0,972	Z_2	32	k_δ	1,149	$k_{n(0,7)}$	1,088
Φ_δ	2,136 Вб	$Z' = Z_0$	42	F_δ	47087,2 А	$k_{n(0,2)}$	1,754
γ	0,761	q	7	$b_{Z\,1/3}$	$44,56 \cdot 10^{-3}$ м	S_{c2}	1,5 м^2
b_{n1}	$29,1 \cdot 10^{-3}$ м	l_c	2,427 м	$S_{Z\,1/3}$	1,447 м^2	l_{c2}	0,274 м
b_{n2}	$28,6 \cdot 10^{-3}$ м	p	1	$k_{n\,1/3}$	1,125	k_μ	1,151
t_1	$65,564 \cdot 10^{-3}$ м	D_a	1,89 м	h_{c1}	$343,06 \cdot 10^{-3}$ м	–	–
t_2	$45,5 \cdot 10^{-3}$ м	W_a	128	S_{c1}	0,894 м^2	–	–
μ_0	$12,56 \cdot 10^{-3}$ Гн/м	h_{k2}	$28,610^{-3}$ м	l_{c1}	0,924 м	–	–
b_{p1}	$50 \cdot 10^{-3}$ м	S_δ	2,612 м^2	$D_{2(0,7)}$	0,734 м	–	–
b_{k1}	$10 \cdot 10^{-3}$ м	l_δ	3,183 м^2	$D_{2(0,2)}$	0,601 м	–	–

Примечание. D_0, D_1, D_2, D_a – диаметр центрального отверстия ротора, внутренний диаметр сердечника статора, диаметр бочки ротора; наружный диаметр сердечника статора; l_1, l_2 – длина сердечника статора и длина бочки ротора; δ – величина воздушного зазора; K_j – поправочный коэффициент, учитывающий форму магнитного поля; Φ_δ – величина магнитного потока в воздушном зазоре; γ – рекомендуемое отношение пазов ротора; b_{n1}, b_{n2} – ширина пазов статора и ротора; t_1, t_2 – зубцовый шаг по расточке статора и ротора; b_{p1}, b_{k1} – ширина пакета статора и ширина вентиляционного канала; b_p и t_p – ширина выступа и шаг рифления поверхности ра; h_{n1}, h_{n2} – высота паза статора и ротора; Z_1, Z_2 – количество зубцов статора и ротора; q – количество пазов, приходящихся на полюс и фазу; l_c – эффективная длина сердечника статора; p – число пар полюсов; W_a – число витков обмотки возбуждения на полюс; h_{k2} – высота клина паза ротора; S_δ – расчетное сечение воздушного зазора; l_δ – расчетная длина статора; $k_{\delta Z}$, $k_{\delta в}$, $k_{\delta р}$, $k_{\delta л}$, $k_{\delta с}$, $k_{\delta \gamma}$, k_δ – коэффициенты, учитывающие зубчатость статора, радиальные вентиляционные каналы, рифление поверхности ротора, срезы зубцов ротора, ступенчатость крайних пакетов статора, зубчатость ротора, коэффициент Картера; F_δ – МДС воздушного зазора; $b_{Z\,1/3}$ и $S_{Z\,1/3}$ – ширина зубца и его сечение на высоте 1/3 высоте от его коронки; $k_{n\,1/3}$ – коэффициент, учитывающий ответвление магнитного потока в паз статора; h_{c1}, S_{c1}, l_{c1} – высота, сечение и длина магнитной линии в спинке статора; $D_{2(0,7)}$, $D_{2(0,2)}$, $b_{Z(0,7)}$, $b_{Z(0,2)}$ и $S_{Z(0,7)}$, $S_{Z(0,2)}$ – диаметры бочки ротора, ширины зубцов и сечения на высоте 0,7 и 0,2 от основания паза ротора, $k_{n(0,7)}$, $k_{n(0,2)}$ – коэффициенты, учитывающие ответвления потока в пазы ротора; λ_2 – проводимость потока рассеяния зубцовой зоны ротора; S_{c2}, l_{c2} – сечение и длина магнитной линии в спинке ротора; k_μ – коэффициент насыщения магнитной цепи.

– для построения характеристики холостого хода $E_0 = f(F_{20})$ необходимо выполнить расчеты для 5–6 точек (табл. 2) (обычно принимаются значения *ЭДС* в о.е. (относительных единицах) равные: 0,6; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4 от номинальной величины *ЭДС).*

Целью расчета магнитной цепи является определение величины магнитодвижущей силы (*МДС* F_{20}) или тока обмотки возбуждения для проведения магнитного потока, чтобы обеспечить заданную величину *ЭДС* (E_0).

Результаты расчетов характеристики холостого хода приведены в табл. 2.

В табл. 2 (в левом столбце) приведены основные величины, необходимые для расчета магнитной цепи, и представляющие значения магнитных индукций в воздушном зазоре (B_δ), в зубцах статора $B_{z1/3}$, в спине статора B_{c1}, в роторе $B_{z(0,7)}$, $B_{z(0,2)}$ и B_{c2}, а также напряженности и *МДС* на этих участках: $H_{z1/3}$, H_{c1}, $H_{z(0,7)}$, $H_{z(0,2)}$, H_{c2}, и F_δ, F_{z1}, F_{c1}, F_{z2}, F_{c2}, F_{20}, и тока в обмотке возбуждения i_{20}.

По данным табл. 2 строится характеристика холостого хода $E_0 = f(F_{20})$. Особенностью программы является то, что она на определенном этапе предлагает расчетчику самостоятельно (вручную), используя таблицы с кривыми намагничивания сталей статора и ротора (вставлены в программу), определять напряженности на отдельных участках магнитной цепи по выбранным значениям индукций. Покажем, как это делается на примере определения напряженности магнитного поля в зубцах статора $H_{z1/3}$ для номинального варианта значения ЭДС. Необходимо для определения этой напряженности открыть табл. 2 и выполнить расчет по следующей схеме. В строке с индукцией $B_{z1/3}$ выбирается ее значение для номинального варианта. Далее в строке для напряженности зубцов статора $H_{z1/3}$ выбирается номинальный вариант и ставится знак **«=»**, после чего необходимо перейти в таблицу (кривые намагничивания листовой холоднокатанной стали марок 3413 поперек проката), которая находится в программе, и в этой таблице выбирается значение напряженности $H_{z1/3}$ при данной индукции. Выделяется данная ячейка, и комбинацией «Enter» определяется напряженность, значение которой автоматически вводится в строку напряженности $H_{z1/3}$ табл. 2. Далее по этой же схеме находятся напряженности для других участков магнитной цепи: спинки статора, зубцов ротора, спинки ротора. После этого в программе автоматически выполняются все расчеты по определению МДС и тока в обмотке возбуждения для номинального варианта. Для построения характеристики холостого хода турбогенератора необходимо задаться рядом значений *ЭДС* (равных 0,6; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4 $E_н$) и повторить расчеты по вышеописанному алгоритму (см. табл. 2). Такие расчеты (вручную) занимают очень много времени и сопровождаются многочисленными ошибками. Автоматизация этих расчетов позволяет значительно сократить время расчетов и повысить их точность.

Далее в программе по значениям *ЭДС* E_0 (по оси *y*) в относительных единицах и *МДС* F_{20} (по оси *x*) обмотки возбуждения в относительных единицах из табл. 2 строится характеристика холостого хода (рис. 1).

Помимо электромагнитного расчета в работе приведены алгоритм и программа расчета коэффициента полезного действия η. Коэффициент полезного действия турбогенератора представляет собой отношение полезной активной мощности P_2 к подведенной активной мощности P_1.

Расчет характеристики коэффициента полезного действия ведется при постоянном напряжении (равном номинальному) и при номинальном коэффициенте мощности.

Исходными данными для расчета коэффициента полезного действия являются значения потерь в стали P_c, механических потерь $P_{м\Sigma}$, суммарных потерь ко-

Таблица 2

Результаты расчета характеристики холостого хода

Table 2

Results of idling characteristic calculation

Основные величины	Ед. изм.	Значения основных величин для построения характеристики холостого хода					
E^*_0	о.е.	0,6	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
E_0	В	3637,2	6062	6668,2	7274,4	7880,6	8486,8
$\Phi_\delta = \frac{E_0}{4,44 \cdot f \cdot W_1 \cdot k_{01}}$	Вб	1,281	2,136	2,349	2,563	2,77	2,99
$B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{S_\delta}$	Тл	0,490	0,817	0,899	0,981	1,062	1,144
$B_{Z1/3} = \frac{\Phi_\delta}{S_{Z1/3}}$	Тл	0,885	1,476	1,623	1,771	1,919	2,066
$B_{c1} = \frac{\Phi_\delta}{2 \cdot S_{c1}}$	Тл	0,717	1,195	1,314	1,434	1,553	1,673
$H_{Z1/3} = f\left(B_{z1/3}\right)$	А/м	314,2	3278	7800	20200	29160	55173,0
$H_{c1} = f(B_{c1})$	А/м	200,5	718,5	1170	2404	5120	10910
$F_\delta = 2 \cdot \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot \delta \cdot k_\delta$	А	28433,24	47388,73	52127,6	56866,4	61605,3	66344,2
$F_{Z1} = 2 \cdot H_{Z1/3} \cdot h_{n1}$	А	103,016	1074,757	2557,38	6622,97	9560,68	18089,6
$F_{c1} = H_{c1} \cdot l_{c1}$	А	370,75	1328,627	2163,52	4445,40	9467,74	20174,4
$F_1 = F_\delta + F_{Z1} + F_{c1}$	А	28907,01	49792,11	56848,52	67934,8	80633,7	104608,
$\Phi_{S2} = \lambda_2 \cdot F_1$	Вб	0,092	0,159	0,182	0,218	0,25904	0,33
$\Phi_2 = \Phi_\delta + \Phi_{S2}$	Вб	1,37	2,296	2,532	2,781	3,036	3,326
$B_{Z(0,7)} = \frac{\Phi_2}{S_{Z(0,7)}}$	Тл	0,83	1,389	1,532	1,683	1,837	2,013
$B_{Z(0,2)} = \frac{\Phi_2}{S_{Z(0,2)}}$	Тл	1,139	1,9	2,098	2,305	2,516	2,757
$H_{Z(0,7)} = f\left(B_{z(0,7)}\right)$	А/м	1198,8	2244	3862	7520	15800	60000
$H_{Z(0,2)} = f\left(B_{Z(0,2)}\right)$	А/м	1475,1	26000	74280	144800	213040	282480
$F_{Z2} = h_{n2} \cdot (H_{Z(0,7)} + H_{Z(0,2)})$	А	370,06	3908,96	10814,85	21081,0	31671,4	47399,2
$B_{c2} = \frac{\Phi_2}{2 \cdot S_{c2}}$	Тл	0,468	0,782	0,862	0,947	1,034	1,133
$H_{c2} = f\left(B_{c2}\right)$	А/м	842,4	1153,8	1226,7	1303,2	1380,6	1469,7
$F_{c2} = H_{c2} \cdot l_{c2}$	А	452,53	619,82	658,98	700,079	741,658	789,52
$F_{20} = F_1 + F_{Z2} + F_{c2}$	А	29729,62	54320,91	68322,35	89716,0	113046,	152797

ISSN 1814-3520

$F^*_{20} = i^*_{20}$	о.е.	0,547	1	1,257	1,651	2,08	2,812
$i_{20} = \frac{F_{20}}{2 \cdot W_2}$	А	109,30	199,709	251,185	329,838	415,613	561,753
$F_{Z2} = h_{n2} \cdot (H_{Z(0,7)} + H_{Z(0,2)})$	А	370,06	3908,96	10814,85	21081,0	31671,4	47399,2
$B_{c2} = \frac{\Phi_2}{2 \cdot S_{c2}}$	Тл	0,468	0,782	0,862	0,947	1,034	1,133
$H_{c2} = f(B_{c2})$	А/м	842,4	1153,8	1226,7	1303,2	1380,6	1469,7
$F_{c2} = H_{c2} \cdot l_{c2}$	А	452,53	619,82	658,98	700,079	741,658	789,52
$F_{20} = F_1 + F_{Z2} + F_{c2}$	А	29729,62	54320,91	68322,35	89716,0	113046,	152797
$F^*_{20} = i^*_{20}$	о.е.	0,547	1	1,257	1,651	2,08	2,812
$i_{20} = \frac{F_{20}}{2 \cdot W_2}$	А	109,30	199,709	251,185	329,838	415,613	561,753

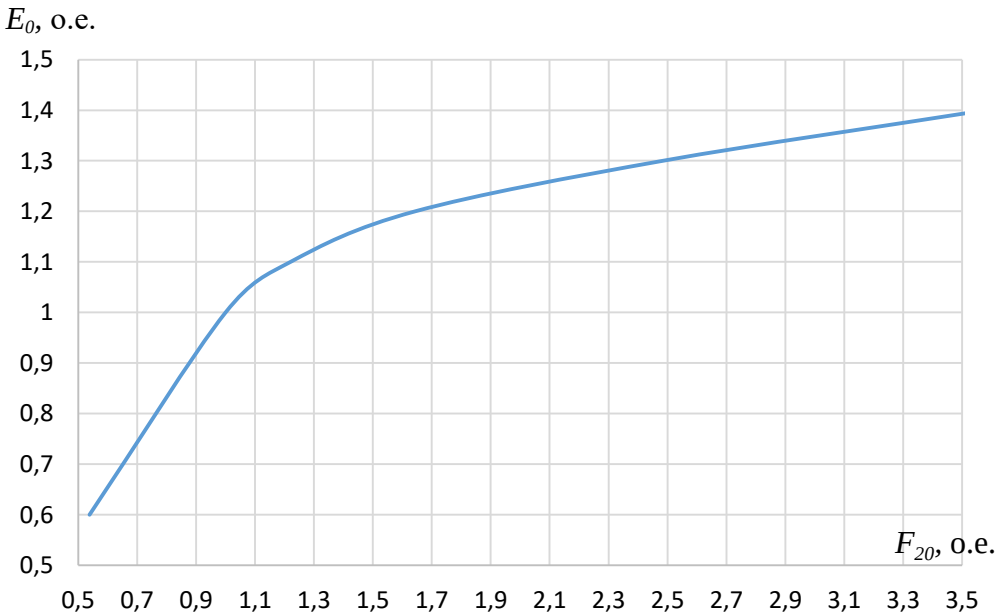


Рис. 1. Характеристика холостого хода турбогенератора
Fig. 1. Turbogenerator idling characteristic

роткого замыкания $P_{k\sum н}$, по которым рассчитываются потери холостого хода P_0, потери короткого замыкания P_k , потери на возбуждение $P_{2\eta}$, суммарные потери в турбогенераторе $P_\sum$, подведенная активная мощность P_1, и сам коэффициент полезного действия в о.е. η^* (табл. 3).

Для построения графика зависимости коэффициента полезного действия η^* от нагрузки задаем следующие значения нагрузки P^* в о.е.: 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25 от $P_н$. По полученным значениям в программе рассчитываются данные, внесенные в табл. 3, и строится график зависимости коэффициента полезного действия η^*, о.е. (ось *y*) от нагрузки *P**, о.е. (ось *x*) (рис. 2).

Как видно из рис. 2, коэффициент полезного действия рассчитанного турбогенератора $\boldsymbol{\eta}$ достигает максимального значения равного (0,984–0,985) в о.е. при нагрузке P^* равной (0,75–1,0) в о.е. от номинальной, что соответствует техническим характеристикам современных турбогенераторов.

Таблица 3

Зависимость коэффициента полезного действия от нагрузки $\eta^*_{,o.e.} = f(P^*)$, о.е.

Table 3

Efficiency dependence on load $\eta^*_{,o.e.} = f(P^*)$, RU

Мощности и потери	Ед. изм.	*P**, о.е.				
P	о.е.	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
P	кВт	8000	16000	24000	32000	40000
$P_0 = P_c + P_{м\Sigma}$	кВт	258	258	258	258	258
$P_к = P_{к\Sigma н} \cdot \left(\frac{I^*}{I^*_н}\right)^2$	кВт	6,98	27,95	62,88	111,783	174,66
$P_{2\eta} = P_{2\eta н} \cdot \left(\frac{i^*_2}{i^*_{2н}}\right)^2$	кВт	4,7	18,9	42,53	75,602	118,13
$P_\Sigma = P_0 + P_к + P_{2\eta}$	кВт	270	305	364	446	551
$P_1 = (P + P_\Sigma)$	кВт	8270	16305	24364	32446	40551
$\eta^*_{,o.e.} = \left(1 - \frac{P_\Sigma}{P + P_\Sigma}\right)$	о.е.	0,96	0,98	0,984	0,985	0,985

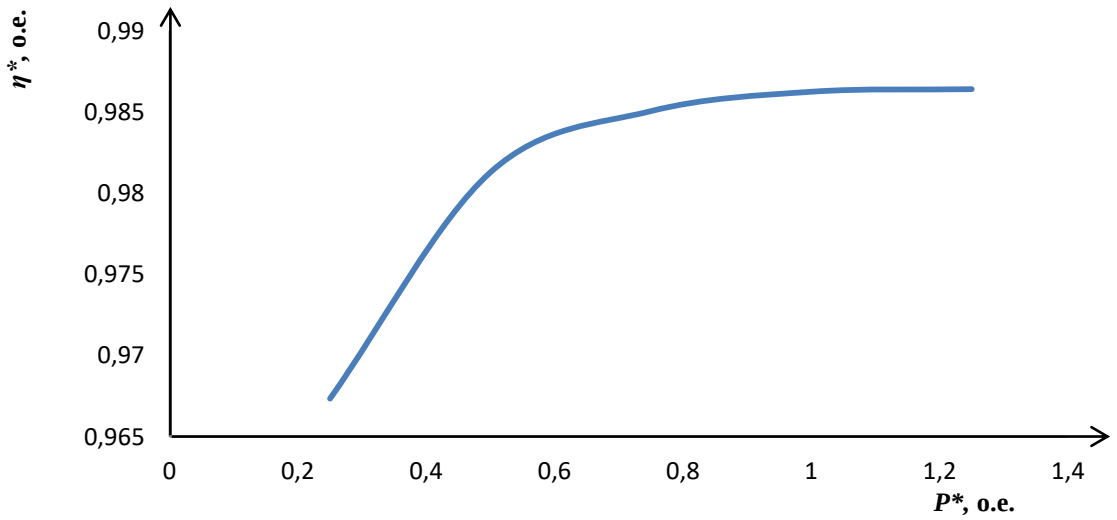


Рис. 2. График зависимости коэффициента полезного действия от нагрузки
Fig. 2. Efficiency vs load graph

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены методика, алгоритмы и разработанные программы, позволяющие автоматически выполнять наиболее сложные и значительные по времени электромагнитные расчеты и вычисления характеристик турбогенераторов с любым числом полюсов, косвенным и непосредственным охлаждением всех его типов, используемых на тепловых и атомных электростанциях.

Достоинствами данной методики, алгоритмов и программы является не только автоматизация расчетов, но также и автоматическое построение графиков харак-

теристик холостого хода и коэффициента полезного действия, удобный и понятный интерфейс, которым без затруднений могут пользоваться проектировщики.

Библиографический список

1. Алексеев Б.А. Генераторы для атомных электростанций // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2006. № 3. С. 40–43.
2. Садохина М.А., Константинов Г.Г. Турбогенераторы для атомных электростанций // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 24–28 апреля 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017. Т. 2. С. 331–336.
3. Бутаков Ф.С. Современное состояние развития атомной энергетики в России и за рубежом // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 19–22 апреля 2016 г.). Иркутск: ИРНИТУ, 2016. Т. 2. С. 147–149.
4. Кади-Оглы И.А. Новое поколение турбогенераторов с водяным и воздушным охлаждением // Электросила: сб. статей. СПб.: Изд-во Электросила, 2003. № 42. С. 16–34.
5. Липатов М.Д. Взрывопожаробезопасные турбогенераторы // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 22–26 апреля 2014 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. Т. 2. С. 244–248.
6. Безгодов А.В., Константинов Г.Г. Особенности проектирования турбогенераторов для атомных электростанций // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 19–22 апреля 2016 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. Т. 2. С. 134–137.
7. Кинозеров А.В. Конструкции и особенности проектирования турбогенераторов с полным водяным охлаждением ТЗВ // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 22–26 апреля 2014 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. Т. 2. С. 303–308.
8. Дячук Д.Н., Константинов Г.Г. Особенности проектирования турбогенераторов нового поколения // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 22–26 апреля 2014 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. Т. 2. С. 217–221.
9. Василенко А.В., Константинов Г.Г. Расчет зубцовой зоны ротора и обмотки возбуждения турбогенератора АЭС // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 19–22 апреля 2016 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. С. 166–170.
10. Иванов Е.А. Конструкции и особенности проектирования турбогенераторов с тройным воздушным охлаждением ТЗФ // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 22–26 апреля 2014 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. Т. 2. С. 240–244.
11. Садохина М.А., Чекан М.А., Константинов Г.Г. Особенности проектирования турбогенератора для АЭС и автоматизация электромагнитных расчетов // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: материалы VIII Международной научно-технической конференции (г. Самара, 2–6 октября 2017 г.). Самара: Изд-во СамГТУ. Т. 1. С. 70–73.
12. Садохина М.А., Константинов Г.Г., Чекан М.А. Некоторые вопросы проектирования и автоматизация электромагнитных расчетов на ЭВМ в турбогенераторах для тепловых и атомных станций // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2019. № 2. С. 11–18.
13. Чекан М.А. Автоматизация электромагнитного расчета турбогенераторов с разными типами охлаждения и разным числом полюсов с помощью ЭВМ // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 23 апреля 2018 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2018. Т. 2. С. 359–364.
14. Polishchuk V.I., Sergeev V.L. Adaptive identification method of a signal from stray magnetic field sensor for turbogenerator diagnostics // Journal of Siberian federal University. Mathematics & Physics. 2015. Vol. 8. No. 2. P. 201–207. https://doi.org/10.17516/1997-1397-2015-8-2-201-207
15. Шитикова Е.В., Табунщик С.С., Табунщик Г.В. Метод формирования объема работ для программ испытаний на основе нечеткого вывода // Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2018. № 4. С. 162–168.
16. Федосин С.А., Шипова Г.М. Современные средства компьютерной графики в образовательном процессе высшего учебного заведения // Инженерные технологии и системы. 2005. С. 153–161. [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-sredstva-kompyuternoy-grafiki-v-obrazovatelnom-protsesse-vysshego-uchebnogo-zavedeniya (12.02.2018).

References

1. Alekseev BA. Generators for nuclear power plants. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost'* = Electro. Electrical Engineering, Electric Power Industry, Electrical Industry. 2006;3:40–43. (In Russ.)
2. Sadohina MA, Konstantinov GG. Turbine generators for nuclear power plants. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. 24–28 April 2017, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2017, vol. 2, p. 331–336. (In Russ.)
3. Butakov FS. Current state of nuclear power development in Russia and abroad. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarod-nym uchastiem* = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. 19–22 April 2016, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2016, vol. 2, p. 147–149. (In Russ.)
4. Kadi-Ogly IA. A new generation of turbine generators with water and air cooling. In: *Elektrosila* = Electric Power. Saint-Petersburg: Elektrosila; 2003, no. 42, p. 16–34.
5. Lipatov MD. Explosion and fireproof turbogenerators. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. 22–26 April 2014, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2017, vol. 2, p. 244–248. (In Russ.)
6. Bezgodov AV. Design features of nuclear power plant turbogenerators. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. 19–22 April 2016, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2016, p. 134–137. (In Russ.)
7. Kinozerov AV. Designs and design features of turbogenerators T3V with full water cooling. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. 22–26 April 2014. Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2014, vol. 2, p. 303–308. (In Russ.)
8. Dyachuk DN. Design features of a new generation of turbine generators. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. 22–26 April 2014. Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2014, vol. 2, p. 217–221. (In Russ.)
9. Vasilenko AV, Konstantinov GG. Calculation of the rotor tooth zone and excitation winding of the nuclear power plant turbogenerator. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. 19–22 April 2016, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2016, p. 166–170. (In Russ.)
10. Ivanov EA. Designs and design features of triple air cooled turbogenerators T3F. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. 22–26 April, 2014. Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2014, vol. 2, p. 240–244. (In Russ.)
11. Sadohina MA, Chekan MA, Konstantinov GG. Features of development a turbine type for a nuclear power plant and automation of electromagnetic calculations. *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2017: materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii* = Electrical Engineering through the eyes of youth – 2017: Proceedings of VIII International scientific and technical conference. 2–6 October 2017, Samara. Samara: Samara State technical University; 2017, vol. 1, p. 70–73. (In Russ.)
12. Sadohina MA, Konstantinov GG, Chekan MA. Some questions of design and automation of electromagnetic calculations on a computer in turbogenerators for thermal and nuclear power plants. *Elektrooborudovanie: Ekspluataciya i remont* = Electrical equipment: operation and repair. 2019;2:11–18. (In Russ.)
13. Chekan MA. Automation of electromagnetic calculation of turbogenerators with different types of cooling and various number of poles using electronic computers. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. 23 April 2018, Irkutsk: Irkutsk Na-

tional Research Technical University; 2018, vol. 2, p. 359–364. (In Russ.)
14. Polishchuk VI, Sergeev VL. Adaptive identification method of a signal from stray magnetic field sensor for turbogenerator diagnostics. *Journal of Siberian federal University*. Mathematics & Physics. 2015;8(2):201–207. https://doi.org/10.17516/ 1997-1397-2015-8-2-201-207
15. Shitikova EV, Tabunshchik SS, Tabunshchik GV. Method for generating the scope of work for fuzzy inference-based test programs. *Radioelektronika, informatika, upravlinnya* = Radioelectronics, Informatics, Control. 2018;4:162–168.
16. Fedosin SA, Shipova GM. Modern means of computer graphics in the educational process of a higher school. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2005:153–161. Available from: https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-sredstva-kompyuternoy-grafiki-v-obrazovatelnom-protsesse-vysshego-uchebnogo-zavedeniya [Accessed 12th February 2018]. (In Russ.)

Критерии авторства

Константинов Г.Г., Ахмедов С.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

Konstantinov G.G., Akhmedov S.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

Константинов Геннадий Григорьевич,
кандидат технических наук,
профессор кафедры электропривода
и электрического транспорта,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: kgg40@mail.ru

Ахмедов Сардор Бахтиярович,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: sarik0696@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gennadiy G. Konstantinov,
Cand. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Electric Drive
and Electric Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: kgg40@mail.ru

Sardor B. Akhmedov,
Master Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: sarik0696@gmail.com

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.31
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1136-1144

Распределение мощности между обмотками тяговых трансформаторов на основе цифровой фильтрации

© П.В. Морозов, Ю.В. Морозов
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Резюме: Цель – представить в статье усовершенствованный метод уравнивания активной мощности на вторичных обмотках тягового трансформатора Скотта в системах электроснабжения железных дорог переменного тока, расположенных вблизи объектов агропромышленного комплекса, систем газоснабжения и т.д. Активное распределение мощности с использованием автоматически управляемых тиристорных мостов с широтно-импульсной модуляцией и емкостных накопителей позволяет снизить почти до нуля несимметрию и несинусоидальность токов и напряжений в первичной трехфазной сети при внезапно появляющихся и исчезающих подвижных тяговых нагрузках, таких как скоростные электропоезда. Для управления токами и напряжениями в обмотках были применены алгоритмы цифровой фильтрации, которые при заданной частоте широтно-импульсной модуляции формируют необходимое количество уровней напряжений. Работоспособность этих алгоритмов была подтверждена компьютерным моделированием в среде Matlab. Предложено усовершенствование метода уравнивания мощности на вторичных обмотках тягового трансформаторного преобразователя Скотта с использованием алгоритмов автоматического регулирования на основе цифровой фильтрации. Устройство уравнивания мощности совместно с трансформатором Скотта дают высокое качество электрической энергии в первичной трехфазной сети в части несимметрии и несинусоидальности токов и напряжений, за счет чего обеспечивается электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения с системой электроснабжения различных (находящихся на железной дороге) объектов сельскохозяйственного назначения, нефтегазового комплекса и т.д.

Ключевые слова: трансформатор Скотта, электромагнитная совместимость, несимметрия, уравнивание мощности, качество электрической энергии, тяговая сеть

Информация о статье: Дата поступления 06 мая 2019 г.; дата принятия к печати 24 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2019 г.

Для цитирования: Морозов П.В., Морозов Ю.В. Распределение мощности между обмотками тяговых трансформаторов на основе цифровой фильтрации. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 6. С. 1136–1144. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1136-1144

Power distribution between traction transformer windings based on digital filtration

Pavel V. Morozov, Yuriy V. Morozov
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to present an improved method of active power equalization on the secondary windings of the Scott traction transformer in the power supply systems of AC railways located in the proximity to the facilities of the agroindustrial complex, gas supply systems, etc. Active power distribution using automatically controlled thyristor bridges with pulse width modulation and capacitive storage devices allows to reduce the asymmetry and unsinusoidality of currents and voltages in the primary three-phase network almost to zero at suddenly appearing and disappearing mobile traction loads, such as high-speed electric trains. To control the currents and voltages in the windings, digital filtering algorithms have been applied, which form the required number of voltage levels at a given frequency of pulse width modulation. The efficiency of these algorithms is confirmed by computer simulation in the Matlab environment. It is proposed to improve the method of power equalization on the secondary windings of the Scott traction transformer with the use of digital filtering-based automatic control algorithms. The power equalization device together with the Scott transformer ensure high quality of electric energy in the primary three-phase network in terms of asymmetry and unsinusoidality of currents and voltages, due to which electromagnetic compatibility of the traction power supply system and the power supply system of various agricultural facilities, oil and gas complex, and others located in the proximity of railways is provided.

Keywords: Scott transformer, electromagnetic compatibility, asymmetry, power equalization, electrical energy quality, traction network

Information about the article: Received May 06, 2019; accepted for publication November 24, 2019; available online December 28, 2019.

For citation: Morozov PV, Morozov YuV. Power distribution between traction transformer windings based on digital filtration. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1136–1144. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1136-1144

1. Введение

Электроснабжение железнодорожного транспорта требует обеспечения электромагнитной совместимости тяговой сети постоянного или переменного тока с первичной трехфазной сетью, а также сетями для обеспечения электрической энергией промышленных и сельскохозяйственных объектов, включая жилые поселения. В [1, 2] рассматривались задачи обеспечения качества электрической энергии в системах тягового электроснабжения и трехфазных сетях, находящихся вблизи объектов сельскохозяйственного назначения и нефтегазового комплекса.

2. Цель исследования

В статье предложено усовершенствовать метод уравнивания активной мощности на вторичных обмотках тягового трансформатора Скотта в системах электроснабжения железных дорог переменного тока, расположенных вблизи объектов агропромышленного комплекса, систем газоснабжения и т.д.

3. Обзор трансформаторных преобразователей

Основными показателями качества электрической энергии являются несимметрия и несинусоидальность [3, 4] на шинах трехфазной сети, подходящих к точке присоединения тяговой сети. Мониторингу упомянутых показателей качества уделяется большое внимание во многих странах мира [5, 6]. Несимметрия и несинусоидальность токов и напряжений оказывают негативное воздействие на различные части систем электроснабжения. К таким воздействиям относятся нагрев и резонансные явления [7]. В точках присоединения тяговых сетей к трехфазным сетям используют трансформаторные преобразователи с различными структурами[1][8].

К ним относятся два однофазных трансформатора и два трехфазных, а также комбинированные из одного трехфазного и одного однофазного. Все упомянутые структуры обладают рядом недостатков, которые мешают их успешно использовать в тяговых сетях. Например, два однофазных трансформатора не обеспечивают симметрию токов и напряжений в трехфазной сети даже при равных фазных нагрузках на вторичной стороне.

Комбинированный трансформатор обеспечивает полную симметрию токов и напряжений при равных фазных нагрузках на вторичной стороне за счет большой несимметрии трехфазного трансформатора, которая превышает 50%. В [9, 10] показано, что наиболее предпочтительной структурой тягового трансформаторного преобразователя является схема Скотта, которая преобразует три фазы в число фаз, не кратное трем (две или четыре). Преимущества схемы Скотта проявляются как в высоковольтных, так и низковольтных системах электроснабжения. В качестве одного из основных достоинств схемы Скотта следует отметить ее так называемую обратимость, сущность которой заключается в возможности преобразования как трех фаз в две, так и наоборот – из двух фаз в три. Это свойство полезно на практике, в случае если недалеко от железной дороги переменного тока находятся насе-

[1]Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учебник. М.: Транспорт, 1982. 524 с.

ленные пункты и производственные объекты с обычной трехфазной системой электроснабжения. В работе [11] для снижения несинусоидальности предложено использование параллельных шунтирующих активных фильтров. Однако эти фильтры подходят только для однофазных и трехфазных систем электроснабжения. В [12] предложен непрерывный алгоритм управления активными фильтрами.

4. Распределение мощности между обмотками трансформатора Скотта

Преобразователь по схеме Скотта обеспечивает почти полную симметрию токов и напряжений в трехфазной сети только при равенстве тяговых нагрузок на вторичной стороне. Однако особенностью железнодорожного транспорта является подвижность нагрузок, в качестве которых рассматриваются электровозы и электропоезда. Такие нагрузки могут внезапно изменять режим работы на том или ином участке системы тягового электроснабжения. Кроме того, несколько таких нагрузок могут одновременно работать в разных режимах. Например, один из электровозов функционирует в режиме тяги, а другой – в режиме выбега. Для уменьшения несимметрии практически до нуля предложено применить на вторичной стороне преобразователя Скотта устройство уравнивания мощности (УУМ). Такое устройство позволяет управлять распределением активной мощности между изменяющимися во времени нагрузками, а также компенсировать высшие гармонические составляющие.

Схема трансформатора Скотта с УУМ приведена на рис. 1. Первичная сторона подключена к фазам A, B, C. Обмотки на первичной стороне имеют количество витков W_A, W_B, W_C, а на вторичной стороне – W_1, W_2, причем $W_1 = W_2$, $W_A = W_B$, $W_C = (\sqrt{3}/2)(W_A + W_B)$. Главной особенностью структуры трансформатора Скотта является соединение выводов одной из обмоток с серединой другой обмотки. Для этой схемы и нагрузок справедливо уравнение баланса мощностей:

$$P_{\text{у}} = \left(P_{\text{н2}} - P_{\text{н1}}\right)/2, \qquad (1)$$

где $P_{\text{н1}}$, $P_{\text{н2}}$ – мощности нагрузок; $P_{\text{у}}$ – мощность УУМ.

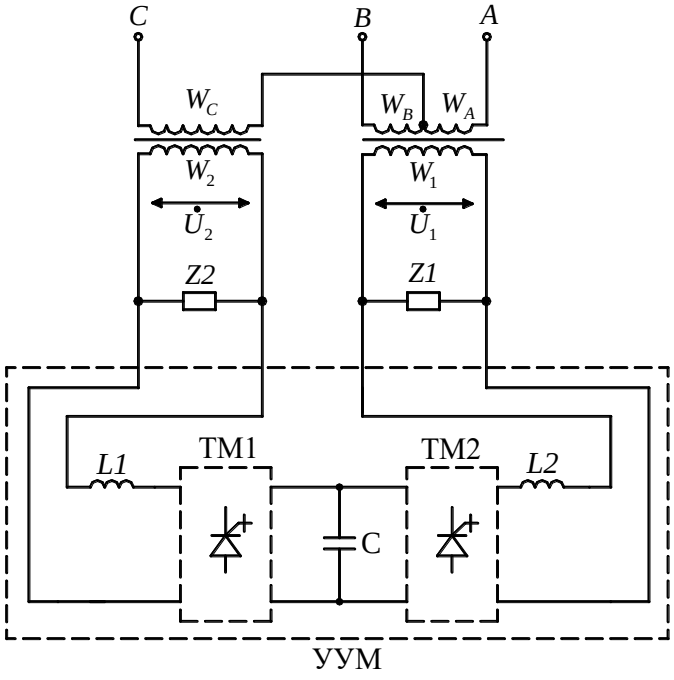


Рис. 1. Обобщенная схема включения устройства уравнивания мощности
Fig. 1. Generalized circuit of power equalization device switching

ISSN 1814-3520

Принято, что активная мощность нагрузки *Z2* превышает активную мощность нагрузки *Z1*. В противном случае значения активной мощности нагрузок в (1) поменяются местами. В данной работе не рассматривается компенсация реактивной мощности, поскольку она является предметом отдельного исследования, которому, например, посвящена работа [13].

Центральным элементом УУМ является емкостной накопитель энергии С. Для распределения мощности между обмотками трансформаторного преобразователя служат два тиристорных моста (ТМ1, ТМ2) и два реактора *L1, L2*. Реакторы обеспечивают поддержание формы тока близкой к синусоидальной. Базовый вариант тиристорного моста из четырех тиристоров может формировать два уровня напряжения, одинаковых по модулю, но разных по знаку. Для обеспечения большего количества уровней напряжения используют мосты со средней точкой, а также группы из нескольких параллельных мостов. В таких мостах уже используется не один, а несколько накопителей энергии. Увеличение количества формируемых уровней напряжения позволяют снизить частоту широтно-импульсной модуляции.

5. Применение цифровой фильтрации для распределения мощности между обмотками трансформатора Скотта

Современные полупроводниковые преобразователи энергии с широтно-импульсной модуляцией, работающие под управлением сигнального процессора, позволяют одновременно уравнивать уровни токов на основной гармонике и снижать уровни высших гармоник. Уравнивание мощностей сводится к уравниванию токов во вторичных обмотках трансформатора на уровне среднего арифметического между токами нагрузок и поддержанием их синусоидальной формы путем стабилизации постоянного напряжения на емкостном накопителе и одновременной корректировки токов в обмотках трансформатора. «Медленное» регулирование напряжения на накопителе обеспечивает распределение активных мощностей, а «быстрое» регулирование токов обеспечивает малую несинусоидальность. С учетом несинусоидальности тока в нагрузках на вторичных обмотках трансформатора корректирующий ток, формируемый УУМ для *i*-й обмотки, имеет следующий вид для одной из нагрузок:

$$i_{yi}(t)=\sum_{n=1}^{\infty} I_{ni}\cdot\sin\left(n\cdot\omega\cdot t+\theta_{ni}\right)- \\ -I_{1i}\cdot\cos\left(\theta_{1i}\right)\cdot\sin\left(\omega t\right), \quad (2)$$

где I_{ni} и θ_{ni} – амплитуда и фаза *n*-й высшей гармоники тока нагрузки; I_{1i} и θ_{1i} – амплитуда и фаза первой гармоники тока нагрузки. Полная энергия, запасенная в УУМ, не должна колебаться в течение периода и обязана удовлетворять следующему равенству:

$$C\cdot\frac{U_C^2}{2}\Bigg|_t^{t+2\pi/\omega}=\int_t^{t+2\pi/\omega} U_S\cdot\sin\left(\omega\cdot t\right)\cdot i_{yi}(t)\,dt. \quad (3)$$

С учетом (3) получено выражение, которое показывает связь между напряжением на накопителе и током во вторичной обмотке трансформаторного преобразователя:

$$\Delta U_C=\sqrt{\frac{U_{Si}\cdot I_{Si}-U_{Si}\cdot I_{1i}\cdot\cos\left(\theta_{1i}\right)}{C}\cdot\Delta t}, \quad (4)$$

где ΔU_C – изменение напряжения на емкостном аккумуляторе *C* на интервале времени Δt; U_{Si} – амплитуда напряжения; I_{Si} – амплитуда тока на *i*-й вторичной обмотке трансформатора Скотта; I_{1i} и θ_{1i} – амплитуда и фаза первой гармоники тока нагрузки, где $i=1,2$.

Таким образом, для уравнивания мощностей во вторичных обмотках трансформаторного преобразователя и подавления высших токовых гармоник служит замкнутый алгоритм автоматического регу-

лирования, который состоит из следующих основных шагов:

1) измерение токов в нагрузках и напряжение на накопителе энергии;

2) вычисление основной гармоники и суммы высших гармоник тока в нагрузке с помощью преобразования Фурье;

3) вычисление ошибки напряжения на конденсаторе (отклонение от заданного постоянного значения);

4) вычисление опорных синусоидальных токов в обмотках трансформаторного преобразователя с использованием алгоритма пропорционально-интегрального (ПИ) регулирования;

5) формирование таких управляющих сигналов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ сигналов) на управляющих входах коммутационных элементов, которые обеспечивают изменение тока в обмотках в такт с опорными токами в зависимости от ошибки по току.

Одновременное поддержание малой несимметрии и малой несинусоидальности токов и напряжений становится возможным за счет использования комбинированной обратной связи, одна из которых «медленная», а другая – «быстрая». Для «медленной» обратной связи в качестве сигнала ошибки служит ошибка напряжения на конденсаторе. Для «быстрой» обратной связи в качестве сигнала ошибки используется ошибка по току.

В УУМ частота ШИМ намного превышает частоту питающей сети. Каждый импульс ШИМ сигнал формирует дискретный отсчет управляемого тока или напряжения. В связи с этим для активного распределения мощности между обмотками трансформаторного преобразователя применимы алгоритмы цифровой фильтрации.

Тиристорные мосты в составе УУМ с учетом активно-индуктивных нагрузок, которые могут работать либо в режиме выпрямителя, либо инвертора, описываются в *z*-области выражением

$$G(z) = G_t(z)\frac{z}{z - e^{-T/\tau}}, \quad (5)$$

где $G_t(z)$ – передаточная функция моста; T – период ШИМ сигнала; τ – постоянная времени активно-индуктивной нагрузки, определяемая ее индуктивностью и сопротивлением потерь.

ПИ-регулятор представляется в *z*-области следующим выражением:

$$G_{pi}(z) = p + p_i \cdot \frac{z}{z-1}, \quad (6)$$

где τ_I – постоянная времени интегратора.

Для замкнутого состояния тиристорного моста с ПИД регулятором передаточная функция будет иметь вид

$$G_C(z) = 1/\,p_c + (1 - 1/\,p_c)\frac{z}{z - e^{-T/p_c\tau_i}}, \quad (7)$$

где $\tau_i = p\,/\,p_i$, $p_c = (p+1)\,/\,p$. Полюса такой системы находятся внутри единичной окружности [7]. Следовательно, система является устойчивой. Выражение (6) для регулятора имеет удобную форму для реализации в современных сигнальных процессорах. Оно является достаточно компактным, не требующим большого времени вычислений.

6. Моделирование распределения мощности между обмотками трансформатора Скотта при использовании цифровой фильтрации

Теоретические исследования трансформаторного преобразователя Скотта с УУМ, подключенного параллельно к вторичным обмоткам, подтверждаются с помощью компьютерного моделирования в среде Simulink SimPower с использованием элементов цифровой фильтрации. Основное внимание уделено моделированию УУМ при резко изменяющихся активно-индуктивных нагрузках, подключенного к вторичным обмотокам трансформаторного преобразователя Скотта.

Моделирование выполнялось при

различных частотах ШИМ и разном количестве формируемых напряжений. На рис. 2 приведено «семейство» зависимостей коэффициента несимметрии (К) от частоты ШИМ для различных значений количества формируемых напряжений N. Несимметрия уменьшается с ростом частоты и количества уровней напряжения. Уменьшение несимметрии при увеличении частоты наблюдается достаточно медленное. При частоте ШИМ более 4 кГц и количестве уровней 5 и более обеспечивается несимметрия меньше 2%, что соответствует требованиям стандарта на качество электроэнергии [14].

Проведенные исследования показали, что УУМ обеспечивает равенство токов в обмотках трансформаторного преобразователя и фазовый сдвиг между ними 90° при изменении тока нагрузки, вызванном изменением режима ее функционирования, например, с тяги на выбег или наоборот (рис. 3).

На рис. 3 обозначения в пояснениях к графикам соответствуют принятым на рис. 1. После изменения нагрузки напряжение на конденсаторной батарее снижается не более чем на 5%, а токи в обмотках преобразователя Скотта одновременно плавно нарастают.

Поскольку УУМ шунтирует обмотки трансформаторного преобразователя, то равенство токов означает равенство мощностей. В свою очередь, из равенства мощностей следует полная симметрия токов и напряжений в питающей трехфазной сети электроэнергетической системы.

7. Обсуждение результатов

Применение цифровой фильтрации в УУМ на вторичных обмотках трансформатора Скотта при резко изменяющихся нагрузках позволяет управлять распределением мощности между обмотками так, чтобы обеспечить минимальную асимметрию токов и напряжений в первичной сети. Плавное изменение токов за счет применения цифровой фильтрации позволяет избежать резких бросков тока в первичной трехфазной сети при резких изменениях нагрузок на вторичной стороне трансформаторного преобразователя.

Улучшение работы УУМ возможно за счет повышения частоты опорного сигнала, включения между обмотками трансформаторного преобразователя и реакторами резонансных индуктивно-емкостных фильтров, увеличения количества уровней напряжения, формируемых УУМ.

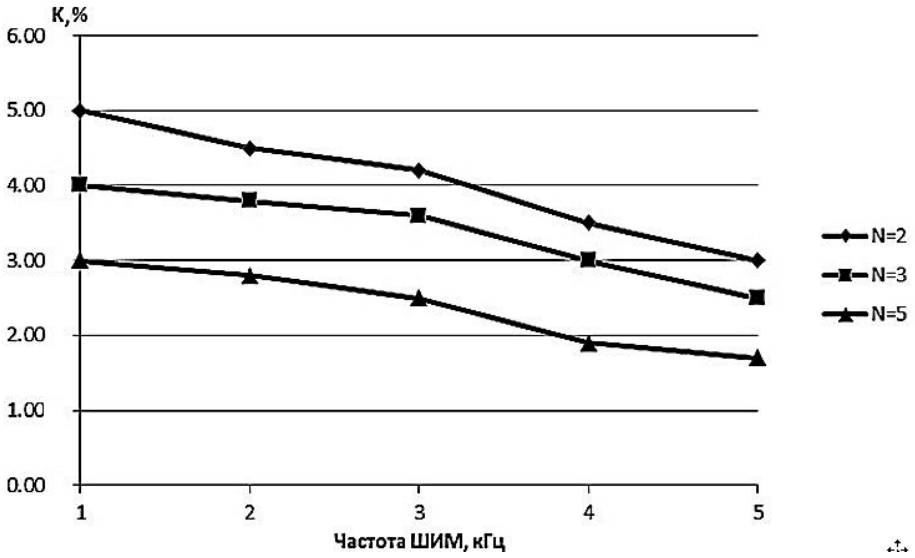


Рис. 2. Результаты зависимостей коэффициента несимметрии от частоты широтно-импульсной модуляции при разном количестве уровней напряжения
Fig. 2. Results of asymmetry coefficient dependences on pulse width modulation frequency under different number of voltage levels

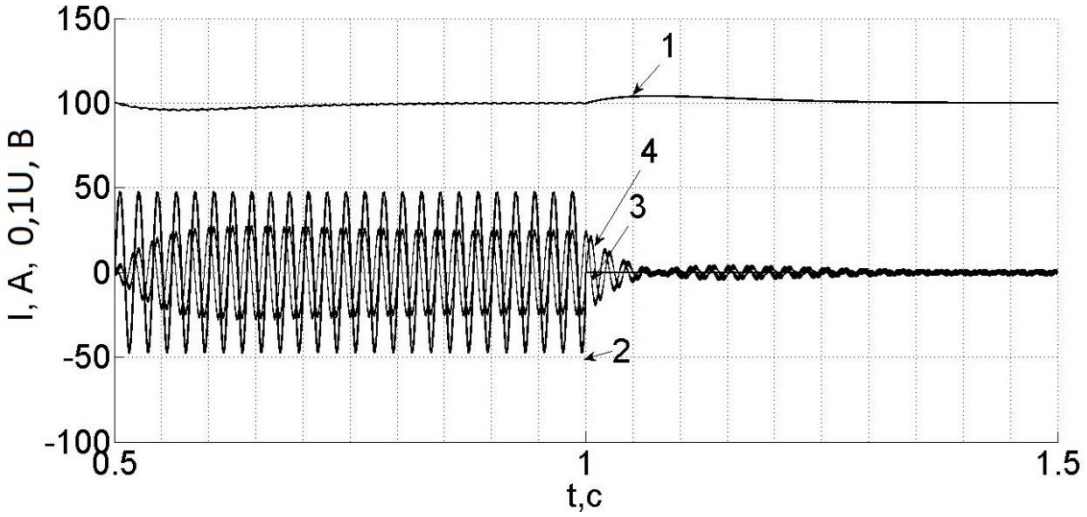


Рис. 3. Результаты моделирования устройства уравнивания мощности: 1 – напряжение на накопителе энергии С; 2 – напряжение на нагрузке Z_1 в режиме тяги; 3, 4 – токи во вторичных обмотках трансформатора
Fig. 3. Results of power equalization device modeling: 1 – voltage on the energy storage device C; 2 – voltage on the load Z_1 in the traction mode; 3, 4 – currents in the secondary windings of the transformer

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложено усовершенствование метода уравнивания мощности на вторичных обмотках тягового трансформаторного преобразователя Скотта с использованием алгоритмов автоматического регулирования на основе цифровой фильтрации. Это достигается за счет использования тиристорных мостов с несколькими емкостными накопителями энергии, которые формируют несколько уровней напряжения, что позволяет снизить частоту ШИМ. УУМ совместно с трансформатором Скотта обеспечивают высокое качество электрической энергии в первичной трехфазной сети в части несимметрии и несинусоидальности токов и напряжений. С помощью компьютерного моделирования проведено исследование зависимости качества электрической энергии от частоты ШИМ и количества уровней напряжений, формируемых УУМ. Показано, что несимметрия, соответствующая требованиям [12], достигается при частоте ШИМ 4 кГц и количестве уровней напряжений, формируемых УУМ, равном 5. За счет малой несимметрии и несинусоидальности обеспечивается электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения с системой электроснабжения различных находящихся рядом с железной дорогой объектов сельскохозяйственного назначения, нефтегазового комплекса и т.д.

Библиографический список

1. Манусов В.З., Морозов П.В., Морозов Ю.В. Электроснабжение предприятий агропромышленного комплекса вблизи скоростных железных дорог переменного тока // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Саратов, 1–3 апреля 2013 г.). Саратов: Издательство СГАУ, 2013. С. 199–200.
2. Хуан А.П., Морозов П.В. Электромагнитная совместимость объектов автоматизации нефтегазового комплекса с системами тягового электроснабжения переменного тока // Актуальные проблемы науки и техники – 2015: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых: в 3 т. (г. Уфа, 16–18 ноября 2015 г.). Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. Т. 2. С. 9–11.
3. Akagi H., Watanabe E., Arades M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditions.* New York: John Wiley & Sons, 2007. 389 p.
4. Moreno-Munoz A. *Power Quality*: Mitigation Technologies in a Distributed Environment. London: Springer-Verlag, 2007. P. 417. [Электронный ресурс]. URL: https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84628-772-5 (27.05.2018).
5. Elphick S., Ciufo P., Drury G., Smith V., Perera S.,

Gosbell V. Large Scale Proactive Power-Quality Monitoring // IEEE Transactions on Power Delivery: An Example From Australia. 2017. Vol. 32. Issue 2. P. 881–889. [Электронный ресурс]. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7464859 (27.05.2018).
6. Elphick S., Gosbell V., Smith V., Perera S., Ciufo P., Drury G. Methods for Harmonic Analysis and Reporting in Future Grid Applications // IEEE Transactions on Power Delivery. 2017. Vol. 32. Issue 2. P. 989–995. [Электронный ресурс]. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7505626 (06.07.2018). https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2586963
7. Коваленко Д.В., Плотников Д.И., Шакенов Е.Е., Кулинич И.О. Негативное воздействие токов высших гармоник на элементы системы электроснабжения // Молодой ученый. 2016. № 28. С. 102–105. [Электронный ресурс]. URL: https://moluch.ru/archive/132/36981/ (26.06.2019).
8. Chen T.H., Kuo H.-Y. Network Modeling of Traction Substation Transformers for Studying Unbalance Effects // IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution. 1995. Vol. 142. Issue 2. P. 103–108. [Электронный ресурс]. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/372988 (26.06.2019) https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19951592
9. Yin Li, Crossley P.A. Voltage balancing in low-voltage radial feeders using Scott transformers // IET Generation, Transmission & Distribution. 2014. Vol. 8. Issue 8. P. 1489–1498. http://dx.doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0528
10. Manusov V.Z., Morozov P.V. Application of Scott-connected Transformers at the Traction Substations of AC Electric Railways // Proceedings of the 2009 International Forum on Strategic Technologies (Ho Chi Minh, 21–23 October 2009). Ho Chi Minh: City University of Technology, 2009. P. 257–261.
11. Voncina D., Nastran J. Parallel active power filter for single- and three-phase non-linear loads // Electrical Engineering. 1998. Vol. 81. P. 217–223. https://doi.org/10.1007/BF01233272
12. Battistelli L., Lauria D., Vernillo P. Control Strategy of Advanced 25 kV-50Hz Electrified Railway Systems // IEE Proceedings on Electric Power Application. 2001. Vol. 1. P. 97–104. https://doi.org/10.1049/ip-epa:20010010
13. Raimondo G., Ladoux P., Lowinsky A., Caron H., Marino P. Reactive power compensation in railways based on AC boost choppers // IET Electrical Systems in Transportation. 2012. Vol. 2. No. 4. P. 169–177. https://doi.org/10.1049/iet-est.2011.0057
14. Дед А.В., Бирюков С.В., Паршукова А.В. К вопросу о стандартах на качество электрической энергии // Омский научный вестник. 2015. № 1. С. 145–147.

References

1. Manusov VZ, Morozov PV, Morozov YuV. Power supply of agroindustrial complex enterprises located in proximity to high-speed railroads of alternating current. *Aktual'nye problemy energetiki agropromyshlennogo kompleksa: materialy VI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* = Actual problems of agroindustrial complex energy: Proceedings of VI International scientific and practical conference. Saratov, April 1-3, 2013. Saratov: Saratov State Agrarian University; 2013, p. 199–200. (In Russ.)
2. Huan AP, Morozov PV. Electromagnetic compatibility of oil and gas complex automation facilities with AC traction power supply systems. *Aktual'nye problemy nauki i tekhniki – 2015: materialy VIII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii molodyh uchenyh* = Actual problems of science and engineering – 2015: Proceedings of VIII International scientific and practical conference of young scientists. November 16–18 2015, Ufa. Ufa: Ufa State oil technical university; 2015, vol. 2, p. 9–11. (In Russ.)
3. Akagi H, Watanabe E, Arades M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditions*. New York: John Wiley & Sons; 2007. 389 p.
4. Moreno-Munoz A. *Power Quality: Mitigation Technologies in a Distributed Environment*. London: Springer-Verlag; 2007. P. 417. Available from: https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84628-772-5 [Accessed 27th May 2018].
5. Elphick S, Ciufo P, Drury G, Smith V, Perera S, Gosbell V. Large Scale Proactive Power-Quality Monitoring: An Example From Australia. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017;32(2):881–889. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/document/7464859 [Accessed 27th May 2018].
6. Elphick S, Gosbell V, Smith V, Perera S, Ciufo P, Drury G. Methods for Harmonic Analysis and Reporting in Future Grid Applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017;32(2):989–995. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/document/7505626 [Accessed 6th July 2018]. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2586963
7. Kovalenko DV, Plotnikov DI, Shakenov EE, Kulinich IO. Negative impact of higher harmonics currents on power supply system elements. *Molodoj uchenyj* = Young Scientists. 2016;28:102–105. Available from: https://moluch.ru/archive/132/36981/ [Accessed 26th June 2019]. (In Russ.)
8 Chen T.H., Kuo H.-Y. Network Modeling of Traction Substation Transformers for Studying Unbalance Effects. IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution. 1995;142(2):103–108. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/document/372988 [Accessed 26th June 2018]. https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19951592
9. Yin Li, Crossley PA. Voltage balancing in low-voltage radial feeders using Scott transformers. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2014;8(8):1489–1498 http://dx.doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0528

10. Manusov VZ, Morozov PV. Application of Scott-connected Transformers at the Traction Substations of AC Electric Railways. Proceedings of the 2009 International Forum on Strategic Technologies. 21–23 October 2009, Ho Chi Minh. Ho Chi Minh: City University of Technology; 2009, p. 257–261.
11. Voncina D, Nastran J. Parallel active power filter for single- and three-phase non-linear loads. *Electrical Engineering*. 1998;81:217–223. https://doi.org/10.1007/BF01233272
12. Battistelli L, Lauria D, Vernillo P. Control Strategy of Advanced 25 kV-50Hz Electrified Railway Systems. *IEE Proceedings on Electric Power Application*. 2001;1:97–104. https://doi.org/10.1049/ip-epa:20010010
13. Raimondo G, Ladoux P, Lowinsky A, Caron H, Marino P. Reactive power compensation in railways based on AC boost choppers. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2012;2(4):169–177. https://doi.org/10.1049/iet-est.2011.0057
14. Ded AV, Biryukov SV, Parshukova AV. On the question of standards for power quality. *Omskij nauchnyj vestnik* = Omsk Scientific Bulletin. 2015;1:145–147. (In Russ.)

Критерии авторства

Морозов П.В., Морозов Ю.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в одинаковой мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Morozov P.V., Morozov Yu.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.

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

Морозов Павел Владимирович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры теоретических основ электротехники,
Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20,
Россия;
e-mail: pv_morozov@mail.ru

Морозов Юрий Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры теоретических основ радиотехники,
Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20,
Россия;
✉ e-mail: sibfrost24@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pavel V. Morozov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University,
20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia;
e-mail: pv-morozov@mail.ru

Yuriy V. Morozov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Theoretical Fundamentals of Radio Engineering,
Novosibirsk State Technical University,
20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia;
✉ e-mail: sibfrost24@mail.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.311
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1145-1154

Измерительные цепи системы диагностики эксцентриситета ротора

© Т.А. Новожилов*, А.Н. Новожилов, А.О. Юсупова**, О.В. Кропотин*, В.А. Ткаченко*, А.Я. Бигун***
**Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*
***Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар, Республика Казахстан*

Резюме: Цель статьи – показать, что в наибольшей степени для реализации системы диагностики электрических машин подходит измерительная схема в виде измерительного моста, питаемого генератором высокой частоты. Вращающиеся электрические машины широко используются в электроэнергетике для производства электрической энергии, а на производстве – в качестве привода различного рода механизмов. Одним из наиболее часто встречающихся повреждений в них является статический эксцентриситет ротора, который возникает из-за разрушения подшипников либо из-за смещения стояков, в которых установлены эти подшипники. Обычно для обнаружения указанного вида повреждений используются системы диагностики эксцентриситета, в которых в качестве информации о повреждении используются токи и электродвижущая сила в обмотках (несмотря на несомненную пользу от таких устройств, широкого распространения они не получили), это вызвано тем, что до настоящего времени не удалось разработать простую систему диагностики, способную надежно (вне зависимости от колебаний параметров питающей сети и нагрузки) выявлять наличие и величину смещения вала ротора. Избавиться от этих недостатков позволяет система диагностики, в которой смещение ротора контролируется емкостным измерительным преобразователем и соответствующей измерительной схемой. Анализ конструктивных особенностей электрических машин показал, что в качестве измерительного преобразователя целесообразно использовать устройство, одним из электродов которого является поверхность вала или сердечника ротора, а другим – электрод в пазовом клине или специальном изолированном корпусе. При этом выяснилось, что реализация системы диагностики с такими измерительными преобразователями возможна только при использовании измерительной цепи, построенной по принципу делителя напряжения, резонатора, емкостно-диодной цепи или измерительного моста. Дальнейший выбор измерительной схемы и ее расположение в машине осуществлялись исходя из конструкций измерительного преобразователя и способа защиты от наводок. Выяснилось, что в наибольшей степени для реализации системы диагностики подходит измерительная схема в виде измерительного моста, питаемого генератором высокой частоты, где измеряемый сигнал – фильтр с такой же частотой. Окончательный выбор схемы измерительной цепи для дальнейшего предпочтительного рассмотрения и развития диагностики эксцентриситета ротора электрической машины основывается на его возможности использования, точности измерений и чувствительности.

Ключевые слова: измерительные цепи, воздушный зазор, эксцентриситет ротора, емкостные измерительные преобразователи, высокая частота, емкостно-диодная цепь

Информация о статье: Дата поступления 13 июня 2019 г.; дата принятия к печати 12 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2019 г.

Для цитирования:: Новожилов Т.А., Новожилов А.Н., Юсупова А.О., Кропотин О.В., Ткаченко В.А., Бигун А.Я. Измерительные цепи системы диагностики эксцентриситета ротора. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2019. Т. 23. № 6. С. 1145–1154. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1145-1154

Measuring circuits of rotor eccentricity diagnostic system

Timofey A. Novozhilov, Alexander N. Novozhilov, Assel O. Yusupova, Oleg V. Kropotin, Vsevolod A. Tkachenko, Alexander Ya. Bigun
Omsk State technical University, Omsk, Russia
S. Toraighyrov Pavlodar State University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan

Abstract: The purpose of the article is to show that the measuring circuit in the form of a measuring bridge powered by a high-frequency generator is most suitable for electric machine diagnostic system implementation. Rotating electric machines are widely used for electrical energy production in electric power industry, and as drives of various types of mech-

anisms. One of their most common damage is the static eccentricity of the rotor arising either due to bearings destruction or to the displacement of risers where the bearings are installed. It is a usual practice to detect the given type of damage using eccentricity diagnosing systems, in which the currents and electromotive force in the windings are used as information about the damage (despite the undoubted benefits of these devices they don't have wide distribution). It is caused by the fact that a simple diagnostic system reliably detecting (irrespective of the fluctuations of the parameters of the supply main and load) the presence and displacement value of the rotor shaft is still not developed. These shortcomings can be overcome through the use of the diagnostic system, in which the rotor displacement is controlled by a capacitive measuring converter and the corresponding measuring circuit. The analysis of the design features of electric machines has shown that it is advisable to make a measuring converter a device, one of the electrodes of which is the surface of the shaft or the rotor core, and the other – the electrode in the groove wedge or a special insulated housing. It is found out that the implementation of the diagnostic system with the measuring converters is possible only when using a measuring circuit built on the principle of a voltage divider, a resonator cavity, a capacitive-type circuit or a measuring bridge. Further selection of the measuring circuit and its location in the machine is carried out on the basis of the measuring converter design and the interference protection method. It is determined that a measuring circuit in the form of a measuring bridge powered by a high-frequency generator where the measured signal is a filter with the same frequency is the most suitable for diagnostic system implementation. The final choice of the measuring circuit diagram for further preferred consideration and development of electric machine rotor eccentricity diagnosis is based on its usability, measurement accuracy and sensitivity.

***Keywords*:** measuring circuits, air gap, rotor eccentricity, capacitive measuring converters, high frequency, capacitive-type circuit

Information about the article: Received June 13, 2019; accepted for publication November 12, 2019; available online December 28, 2019.

For citation: Novozhilov TA, Novozhilov AN, Yusupova AO, Kropotin OV, Tkachenko VA, Bigun AYa. Measuring circuits of rotor eccentricity diagnostic system. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1145–1154. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1145-1154

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в электроэнергетике для производства электроэнергии и в качестве привода используют синхронные и асинхронные электрические машины[1].

У мощных электрических машин со сварным корпусом в качестве опоры ротора используют подшипники, которые закрепляются в специальных стояках. В свою очередь, стояки с помощью болтов прикрепляются к нижней несущей половине торцевого щита или к специальным выносным опорам. В связи с этим одним из наиболее часто встречающихся повреждений в таких машинах является статический эксцентриситет ротора [1–8], который возникает из-за смещения стояков. Для контроля величины эксцентриситета ротора в процессе эксплуатации используют специальные системы диагностики.

Однако, несмотря на несомненную пользу от таких устройств, широкого распространения они не получили [3–5]. Одной из причин является то, что до настоящего времени не удалось разработать простое устройство, способное надежно (вне зависимости от колебаний параметров питающей сети и нагрузки) выявлять наличие и величину смещения вала ротора.

Однако, как показано в [3–8], в значительной мере этим требованиям удовлетворяет устройство, в котором эксцентриситет ротора определяется путем контроля емкости измерительного преобразователя (ИП) относительно поверхности сердечника ротора. Один из вариантов конструкции и размещения такого ИП в электрической машине приведен на рис. 1 *a*, где 1 и 2 – сердечники ротора и статора; 3 и 4 – пазовый клин с наклеенной на него металлической фольгой. В результате одним электродом такого емкостного ИП является фольга 4, а другим – поверхность сердечника 1 ротора. То есть один из электродов такого ИП является заземленным.

Блок-схема устройства диагностики показана на рис. 1 *b*, где емкостные ИП 5-8 с помощью соединительных проводов 9 подключаются к измерительной цепи 10.

[1]Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник. М.: Энергия, 1980. 909 с.

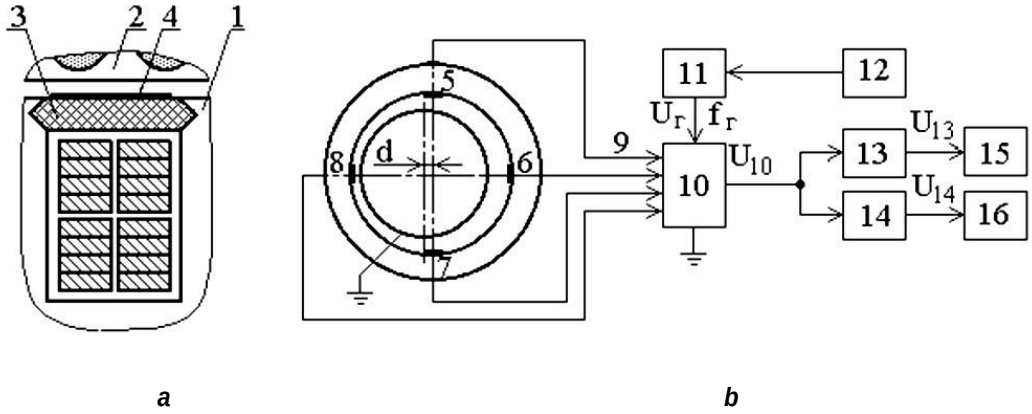


Рис. 1. Блок-схема устройства для реализации предлагаемого способа
Fig. 1. Block diagram of the device for proposed method implementation

Питание измерительной цепи 10 осуществляется генератором 11 переменного тока с частотой $f_Г$ и напряжением $U_Г$, а самого генератора – источником 12 постоянного тока. К выходу измерительной цепи 10 подключены пороговые элементы 13 и 14, выходы которых подключены к блокам индикации 15 и формирователю отключающего сигнала 16.

В соответствии с рис. 1 и зависимостью $C_{ИП} = f(d)$ [8, 9], полноценный контроль смещения ротора у одного из торцов машины требует четырех обыкновенных емкостных ИП или двух дифференциальных, где $C_{ИП}$ – рабочая емкость ИП; d – величина смещения ротора при эксцентриситете.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ известных методов измерения перемещений с помощью емкостных ИП[2] [9] показал, что в основном ограничение чувствительности системы измерения происходит за счет наводок и паразитных емкостей в измерительной цепи 10 и соединительных проводах 9. В электрической машине наводки возникают под воздействием магнитных и электрических полей с частотами основной и высших гармоник сети. В свою очередь, величина паразитных емкостей определена емкостями проводников ИП и измерительной цепи относительно металлических элементов конструкции этой электрической машины.

Емкости ИП на пазовом клине невелики и для электрических машин мощностью 100–8000 кВт составляют порядка 10–100 пФ. Поэтому даже при частотах $f_Г$ 10^5–10^7 Гц напряжения $U_Г$ их реактивное сопротивление велико и может составлять порядка 10^3–10^7 Ом. В связи с этим токи в цепях с ИП малы, а в измерительных цепях требуется использование операционных усилителей. Допустимое значение напряжения на электродах ИП также может быть достаточно велико. Однако его, как правило, ограничивают условиями построения измерительной цепи[2].

В соответствии с [10], выбор измерительной цепи в основном определен конструкцией ИП и защитой от наводок, которых можно избежать, если тщательно экранировать как ИП, так и все соединительные линии измерительных схем. Или использовать в измерительных схемах частоту переменного тока, отличающуюся от частоты наводок.

Однако экранированный провод между ИП и измерительной цепью обладает емкостью $C_{ЭП}$, которая определена размерами жилы и экрана. В результате

[2]А.с. № 1332466, СССР, МПК H02K 11/00, G01R 31/34. Способ измерения динамического эксцентриситета электрической машины / Бакшеев Н.В., Грюнер А.И., Собачинский Л.К., Доронина Г.А. Заявл. 05.09.85; опубл. 23.08.87. Бюл. № 31.

(при неудачном выборе точки заземления экрана) эта емкость может оказаться подключенной параллельно емкости ИП, что приводит к падению чувствительности ИП. Таким образом, в соответствии с [10, 11], величина падения чувствительности ИП определяется как

$$\chi = \frac{\Delta C_{ИП}}{C_{ИП}} - \frac{\Delta C_{ИП}}{\left(C_{ИП} + C_{ЭП}\right)}, \quad (1)$$

где $\Delta C_{ИП}$ – изменение рабочей емкости ИП при эксцентриситете ротора.

При этом нестабильность емкости $C_{ЭП}$, возникающая в процессе эксплуатации электрической машины, будет восприниматься как изменение рабочей емкости $\Delta C_{ИП}$. Поэтому при выборе измерительной цепи с емкостными ИП следует обращать внимание на:

– возможность возникновения так называемых паразитных емкостей;

– линейность зависимости выходного параметра измерительной цепи от величины воздушного зазора между электродом ИП и поверхностью сердечника ротора;

– то, что емкостные ИП являются высокоомными, а величина их емкости определяется как

$$C_{ИП} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 h_{ИП} l_{ИП}}{\delta_н \pm d}, \quad (2)$$

где ε и ε_0 – диэлектрическая постоянная диэлектрика и вакуума; $l_{ИП}$ и $h_{ИП}$ – длина и ширина электрода; $\delta_н = \left(r_1 - r_2\right)$ – номинальная величина воздушного зазора; r_1 и r_2 – радиусы расточек статора и ротора.

В связи с этим и [12–15] измерительная цепь с емкостными ИП может строиться по принципу делителя напряжения, резонатора, емкостно-диодной цепи и измерительного моста.

Пример схемы измерительной цепи в виде делителя напряжения приведен на рис. 2, где изменение расстояния между электродами ИП и емкостью $C_{ИП}$ преобразуется в выходное напряжение

$$U_{ВЫХ} = \frac{U_Г C_1 \left(\delta_н \pm d\right)}{\varepsilon_0 h_{ИП} l_{ИП}}. \quad (3)$$

То есть в этом случае зависимость выходного напряжения $U_{ВЫХ}$ от величины зазора $\delta_н \pm d$ будет линейной. В то же время емкости экранированных проводов $C_{ИПЭ}$, $C1_Э$, $C2_Э$ практически не влияют на работу ИП ввиду того, что $C_{ИПЭ}$ и $C2_Э$ включены параллельно источнику сигнала $U_Г$ и операционному усилителю $A1$, имеющим низкие выходные сопротивления, а емкость $C1_Э$ – параллельно входам усилителя, т.е. напряжение на этой емкости близко к нулю.

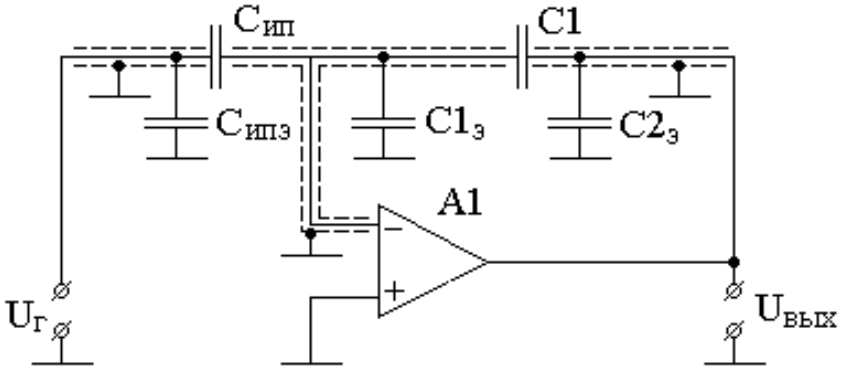


Рис. 2. Схема измерительной цепи с измерительным преобразователем, построенная по принципу делителя напряжений
Fig. 2. Diagram of a measuring circuit with a measuring converter built on the principle of the voltage divider

Однако такую измерительную цепь можно использовать только для ИП с изолированными от корпуса электродами. То есть емкостный ИП на рис. 1 *a* с измерительной цепью на рис. 2 использовать нельзя.

Пример схемы измерительной цепи, построенной по принципу резонатора, приведен на рис. 3 *a*. В ней генератор высокой частоты (ГВЧ) питает напряжением $C1_Э$ с частотой $f_Г$, индуктивно связанный с ним контур из индуктивности $L_Н$ подстрочного конденсатора $C_П$ и емкостного ИП $C_{ИП}$. Напряжение $U_К$, снимаемое с контура, увеличивается усилителем $У$ и регистрируется измерительным прибором $ИПр$. Шкала $ИПр$ может быть проградуирована в единицах измеряемой величины. Характерная зависимость $U_К(C_{ИП})$ при фиксированном значении $C_П$ приведена на рис. 3 *b*.

Настройка измерительной цепи производится следующим образом. Первоначально определяется среднее значение емкости ИП:

$$C_{СР} = \frac{(C_{мах} + C_{мин})}{2}, \qquad (4)$$

где $C_{мин}$ и $C_{мах}$ – минимальное и максимальное значения емкости ИП.

Затем по известной величине индуктивности $L_Н$ и частоте $f_Г$ определяется емкость $C_Р$-контура, при которой наступает резонанс напряжений. В соответствии с [16],

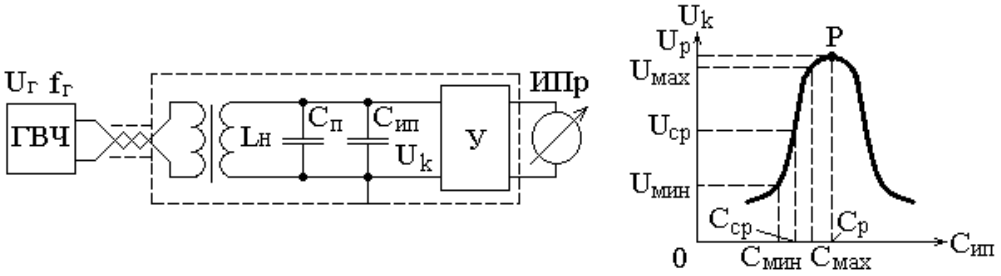
$$C_Р = 1/(2\pi f_Г)^2 L_Н. \qquad (5)$$

В результате подстрочного конденсатора

$$C_П = C_Р - C_{СР}. \qquad (6)$$

Этим обеспечиваются высокая чувствительность измерения (до 0,001%) и близкая к линейной шкала измерительного прибора $ИПр$. В результате перемещение подвижной пластины ИП в виде ротора электрической машины сопровождается изменением напряжения контура. Однако заземление одной из пластин ИП приведет к возникновению паразитных емкостей и неправильной работе данного устройства. Избавиться от этого частично удается путем экранирования контура $L_Н$, $C_П$ и усилителя $У$, а также соединением генератора высокой частоты с измерительной схемой бифилярным экранированным проводом.

Пример схемы измерительной цепи, построенной по принципу емкостно-диодной, приведен на рис. 4. Емкостные



a *b*

Рис. 3. Резонансная схема включения емкостного измерительного преобразователя: a – схема измерительной цепи, построенной по принципу резонатора; b – характерная зависимость $U_К(C_{ИП})$ при фиксированном значении $C_П$

Fig. 3. The resonant circuit of inclusion of capacitive measuring converter's: a – circuit measuring circuit, built on the principle of the resonator; b – characteristic dependence $U_К(C_{ИП})$ at a fixed value $C_П$

ИП $C_{ИП1}$ и $C_{ИП2}$ присоединяются к генератору высокой частоты с помощью четырех диодов VD1-VD4 и двух дополнительных конденсаторов $C1$ и $C2$. В каждом полупериоде переменного напряжения $U_Г$ открывается соответствующая пара диодов VD1,VD4 или VD2, VD3. Если емкости ИП $C_{ИП1}$ и $C_{ИП2}$ не равны между собой, то при равенстве конденсаторов C_1 и C_2 на них появится постоянное выходное напряжение

$$U_{ВЫХ} \approx \frac{2U_Г(C_{ИП1} - C_{ИП2})}{C_{ИП1} + C_{ИП2} + 2\dfrac{C_{ИП1}C_{ИП2}}{C1}}. \quad (5)$$

Но величина выходного напряжения этого устройства нестабильна из-за падения напряжения на диодах и шунтирования ИП паразитными емкостями. От шунтирования ИП в значительной степени можно избавиться путем экранирования соединительных проводников. Однако нестабильность выходного напряжения, вызванная наличием даже тщательно подобранных диодов в измерительной цепи, не позволяет создать достаточно чувствительное устройство диагностики.

Несколько улучшенные результаты позволяет получить измерительная цепь, построенная по принципу измерительного моста. Один из вариантов такой измерительной цепи приведен на рис. 5. Это стало возможным в связи с выпрямлением переменного напряжения на выходной диагонали моста с помощью диодов VD1-VD4.

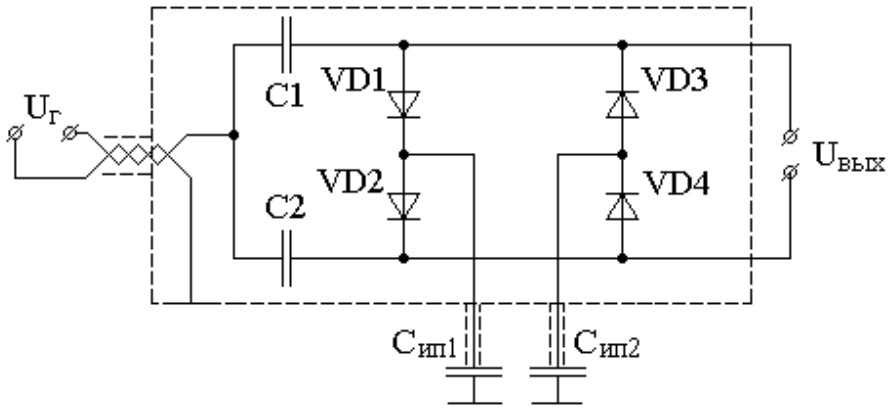


Рис. 4. Схема измерительной цепи с измерительным преобразователем, построенная по принципу емкостно-диодной цепи
Fig. 4. Diagram of a measuring circuit with a measuring converter built on the principle of a capacitance-type circuit

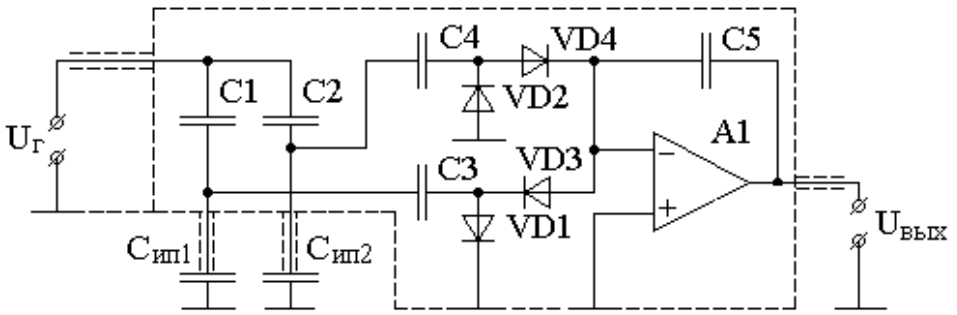


Рис. 5. Схема измерительной цепи с измерительным преобразователем, построенная по принципу измерительного моста
Fig. 5. Diagram of a measuring circuit with a measuring converter built on the principle of the measuring bridge

Такая схема пригодна для использования как дифференциального емкостного ИП, так простого ИП. В первом случае ИП представлен емкостями $C_{ИП1}$ и $C_{ИП2}$ при постоянной емкости $C1$ и построечной емкости $C2$. Для того чтобы избавиться от наводок в такой измерительной цепи, ее элементы рекомендуется располагать в одном корпусе с ИП и экранировать. Если используется простой ИП с емкостью $C_{ИП1}$, то в этом случае $C_{ИП2}$ заменяется на построечную емкость, которая размещается в экранированной зоне, а емкости C_1 и C_2 принимаются постоянными и равными по величине.

Следует добавить, что точная балансировка такого измерительного моста может быть затруднена из-за нестабильности частоты напряжения генератора высокой частоты и наличия в нем гармоник. Поэтому для питания измерительных мостов следует использовать генераторы с кварцевыми резонаторами.

Наводки в соединительных проводах 9 создаются электрическими и магнитными полями внутри электрической машины. Очевидно, эти наводки будут содержать как основную гармоническую с частотой 50 Гц, так и ее высшие гармоники. Что значительно влияет на точность измерения смещения ротора. Избавиться от этого можно, если измерения осуществлять на частоте, определяемой основной гармонической генератора [15]. Схема такой измерительной цепи, построенной по принципу измерительного моста [16] ИП, подвижный электрод которого заземлен, приведена на рис. 6. В этой измерительной цепи защита от высших гармонических генератора и наводок осуществляется с помощью полосно-пропускающего фильтра, настроенного на резонансную частоту $f_Г$.

Такая схема допускает использование как элементарного ИП, так и дифференциального емкостного [16]. На ней полосно-пропускающий фильтр реализован на операционном усилителе $A1$, в отрицательную обратную связь которого включен двойной Т-образный мост на емкостях $C3$ – $C5$ и резисторах $R2$ – $R4$. Резонансная частота этого моста определяется выражением

$$f_Г = 1/2\pi(R4)(C5). \qquad (4)$$

Для снижения воздействия электрических и магнитных полей на измерительную цепь ее элементы следует располагать в непосредственной близости от ИП или в одном корпусе с ним, а также экранировать. При этом генератор высокой частоты рекомендуется соединять с измерительной схемой бифилярным экранированным проводом.

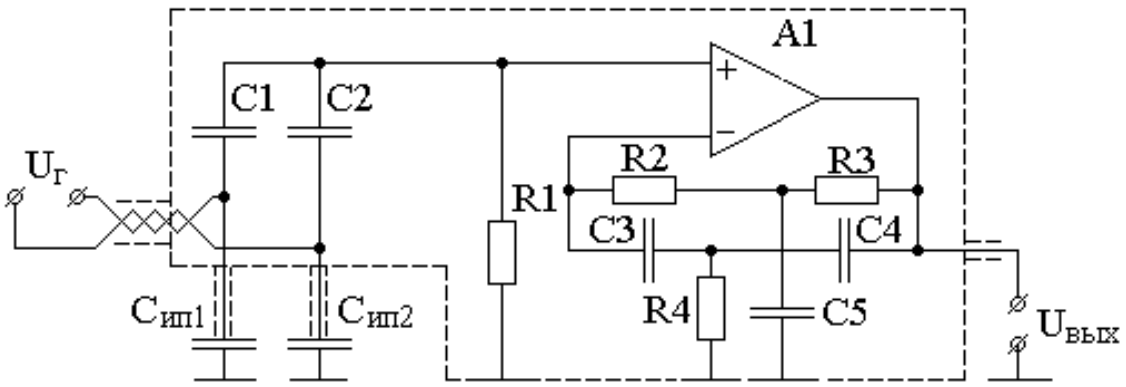


Рис. 6. Схема измерительной цепи с измерительным преобразователем, построенная по принципу измерительного моста с фильтром
Fig. 6. Diagram of the measuring circuit with a measuring converter built on the principle of a measuring bridge with a filter

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показал анализ наиболее известных способов построения измерительной цепи, в наибольшей степени удовлетворяет требованиям системы диагностики эксцентриситета ротора электрической машины с ИП на пазовом клине и заземленным электродом измерительная цепь в виде измерительного моста с фильтром.

Библиографический список

1. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. Л.: Энергия, 1976. 247 с.
2. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах / пер. с англ. М.: Энергия, 1981. 351 с.
3. Полищук В.И., Новожилов А.Н., Исупова Н.А. Обзор способов диагностики эксцентриситета ротора машин переменного тока // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 6. С. 26–29.
4. Zijian Liu, Jin Huang. Improved high resolution estimation approach for rotor fault diagnosis // IEEE XI International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). 2017. P. 524–530. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/320294251_Improved_high_resolution_estimation_approach_for_rotor_fault_diagnosis (19.03.2019).
https://doi.org/10.1109/DEMPED.2017.8062405
5. Corne B., Knockaert J., Desmet J. Misalignment and unbalance fault severity estimation using stator current measurements // IEEE XI International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). 2017. P. 247–253. https://doi.org/10.1109/DEMPED.2017.8062363
6. Новожилов А.Н., Юсупова А.О., Новожилов Т.А. Выбор метода выявления эксцентриситета ротора электрической машины статора // Вестник ПГУ. Энергетическая серия. 2016. № 4. С. 117–126.
7. Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Пашали Д.Ю., Бойкова О.А. Обзор современных методов и средств оперативной диагностики электромеханических преобразователей энергии // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2010. Т. 14. № 4. С. 73–79.
8. Новожилов А.Н., Юсупова А.О., Новожилов Т.А. Выбор типа емкостного измерительного преобразователя для диагностики эксцентриситета ротора электрической машины // XVII Сатпаевские чтения: материалы Междунар. науч. конф. Молодых ученых, магистрантов, студентов и школьников. Павлодар: Кереку, апрель 2017. Т. 19. С. 133–138.
9. Новожилов Т.А., Новожилов А.Н., Юсупова А.О. Моделирование электрической емкости измерительного преобразователя // Омский научный вестник. 2018. № 5. С. 72–75. https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-161-72-75
10. Пат. № 32999, Республика Казахстан, МПК H02H 7/06, H02H 7/08, H02K 11/00. Способ определения эксцентриситета ротора в электрической машине / А.Н. Новожилов, А.О. Юсупова, Т.А. Новожилов; заявитель и патентообладатель Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения «Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова» Министерства образования и науки Республики Казахстан. Заявл. 19.04.2017; опубл. 06.08.2018. Бюл. № 29.
11. Грохольский А.Л., Никулин В.И. О перспективах применения емкостных датчиков // Автометрия. № 1. 1967. С. 17–23.
12. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин (Измерительные преобразователи). Л.: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.
13. Джежора А.А. Электроемкостные преобразователи и методы их расчета. Минск: Изд. дом. «Белорусская наука», 2008. 351 с.
14. Фремке А.В. Электрические измерения. 5-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергия, 1980. 392 с.
15. Ацюковский В.А. Емкостные дифференциальные датчики перемещения емкости. М.: Госэнергоиздат, 1960. 102 с.
16. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. 7-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1978. 528 с.

References

1. Ermolin NP, Zherikhin IP. *Reliability of electric machinery*. Leningrad: Energy; 1976. 247 p. (In Russ.)
2. Geller B, Hamata V. Higher harmonics in asynchronous machines, 1981, 351 p. (Russ. ed.: *Vysshie garmoniki v asinhronnyh mashinah*. Moscow, Energy, 1981. 351 p.)
3. Polishchuk VI, Novozhilov AN, Isupova NA. Features of AC Machine Rotor Eccentricity Diagnostics. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* = Russian Electromechanics. 2011;6:26–29. (In Russ.)
4. Zijian Liu, Jin Huang. Improved high resolution estimation approach for rotor fault diag-nosis. IEEE XI International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). 2017, p. 524–530. Available from: https://www.researchgate.net/publication/320294251_Improved_high_resolution_estimation_approach_for_rotor_fault_diagnosis [Accessed 19th March 2019].
https://doi.org/10.1109/DEMPED.2017.8062405
5. Corne B, Knockaert J, Desmet J. Misalignment and unbalance fault severity estimation using stator current measurements // IEEE XI International Symposium on

Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). 2017. P. 247–253. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/document/8062363 [Accessed 19th March 2019]. https://doi.org/10.1109/DEMPED.2017.8062363
6. Novozhilov AN, Yusupova AO, Novozhilov TA. Choice of method for detection of electrical machinery rotor eccentricity. Vestnik Pavlodarskogo gosudarstvennogo universiteta. Energy series. 2016;4:117–126. (In Russ.)
7. Ismagilov FR, Khairullin IKh, Pashali DYu, Boykova OA. The review of modern methods and devices of operation diagnostic of electromechanical energy converter. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta.* = Bulletin of Ufa State Aviation Technical University. 2010;14(4):73–79. (In Russ.)
8. Novozhilov AN, Yusupova AO, Novozhilov TA. Choosing the type of capacitive measuring transducer for electric machine rotor eccentricity diagnosing. *XVII Satpaevskie chteniya: materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii molodyh uchenyh, magistrantov, studentov i shkol'nikov*= XVII XVII Satpaev Readings: proceedings of the International scientific conference of young scientists, undergraduates, students and schoolchildren. Pavlodar: Kereky; 2017, vol. 19, p. 133–138. (In Russ.)
9. Novozhilov TA, Novozhilov AN, Yusupova AO. Simulation of electrical capacitance of measuring transducer. *Omskij nauchnyj vestnik* = Omsk Scientific Bulletin. 2018;5:72–75. https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-161-72-75 (In Russ.)
10. Novozhilov AN, Yusupova AO, Novozhilov TA. Method for determining electric machinery rotor eccentricity. Patent Republic of Kazakhstan, no. 32999; 2018. (In Russ.)
11. Grokholsky AL, Nikulin VI. On application prospects of capacitive sensors. *Avtometriya* = Optoelectronics, Instrumentations and Data Processing. 1967;1:17–23. (In Russ.)
12. Levshina ES, Novitsky PV. *Electrical measurements of physical quantities (Measuring transducers)*. Leningrad: Energoatomizdat; 1983. 320 p. (In Russ.)
13. Jezhora AA. *Electric capacitance converters and their calculation methods.* Minsk: Belarusian science; 2008. 352 p.
14. Fremke AV. *Electrical measurements*. Leningrad: Energy; 1980. 392 p. (In Russ.)
15. Atsyukovskiy VA. Capacitive differential sensors of capacitance displacement. Moscow: Gosenergoizdat, 1960. 102 p. (In Russ.)
16. Bessonov LA. *Theoretical Foundations of Electrical Engineering*. Moscow: Vysshaya shkola; 1978. 528 p. (In Russ.)

Критерии авторства

Новожилов Т.А., Новожилов А.Н., Юсупова А.О., Кропотин О.В., Ткаченко В.А., Бигун А.Я. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Novozhilov T.A., Novozhilov A.N., Yusupova A.O., Kropotin O.V., Tkachenko V.A., Bigun A.Ya. 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

Новожилов Тимофей Александрович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры электроснабжения
промышленных предприятий,
Омский государственный технический университет,
644011, г. Омск, ул. Гусаров, 115, Россия;
e-mail: timokvey@mail.ru

Новожилов Александр Николаевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры электроэнергетики,
Павлодарский государственный университет
им. С. Торайгырова,
140000 РК, г. Павлодар, ул. Толстого, 105,
Казахстан;
e-mail: novozhilova_on@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Timofey A. Novozhilov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Power Supply of Industrial Enterprises,
Omsk State Technical University,
115, Gusarov St., Omsk 644011, Russia
e-mail: timokvey@mail.ru

Alexander N. Novozhilov,
Dr. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Electric Engineering,
S. Toraighyrov Pavlodar State University,
105 Tolstoy St., Pavlodar 140000 RK, Kazakhstan,
e-mail: novozhilova_on@mail.ru

Юсупова Асель Оразовна,
докторант,
Павлодарский государственный университет
им. С. Торайгырова,
140000 РК, г. Павлодар, ул. Толстого, 105,
Казахстан;
e-mail: aselasp@mai.ru

Кропотин Олег Витальевич,
доктор технических наук,
доцент кафедры физики,
Омский государственный технический университет,
644106, г. Омск, ул. Дианова 19а, Россия
e-mail: kropotin@mail.ru

Ткаченко Всеволод Андреевич,
аспирант
Омский государственный технический университет,
644013, г. Омск, СНТ Любитель-4, уч. 83, Россия;
✉ e-mail: sevaatmail@gmail.com

Бигун Александр Ярославович,
кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры
электроснабжения промышленных предприятий,
Омский государственный технический университет,
644089, г. Омск, ул. Мира 108б, Россия;
e-mail: barsbigun@list.ru

Assel O. Yusupova,
Doctoral Student,
S. Toraighyrov Pavlodar State University,
105 Tolstoy St., Pavlodar 140000 RK, Kazakhstan,
e-mail: aselasp@mai.ru

Oleg V. Kropotin,
Dr. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Physics,
Omsk State Technical University,
19a Dianov St., Omsk 644106, Russia,
e-mail: krov@omgtu.ru

Vsevolod A. Tkachenko,
Postgraduate Student,
Omsk State Technical University,
Horticultural nonprofit partnership Lyubitel-4, Site 83,
Omsk 644014, Russia,
✉ e-mail: sevaatmail@gmail.com

Alexander Ya. Bigun,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Lecturer of the Department
of Power Supply of Industrial Enterprises,
Omsk State Technical University,
108b, Mira St., Omsk 644089, Russia,
e-mail: barsbigun@list.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 519.81
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1155-1164

Поддержка принятия решения о выборе пункта строительства тепловой электростанции на основе порогового метода многокритериального анализа

© П.С. Панкратьев
Братский государственный университет, г. Братск, Россия

Резюме: Целью настоящей статьи является рассмотрение задачи принятия решений по размещению тепловой электростанции в районе с децентрализованным электроснабжением. Задача выбора места размещения любой электростанции традиционно состоит из двух основных этапов – выбора пункта размещения и площадки строительства станции, в ходе которого уточняется мощность последней. Первый из перечисленных этапов наиболее сложен ввиду таких факторов, как многокритериальность, высокая степень неопределенности информации, слабая структурированность. В особенности усложняет выбор пункта размещения необходимость предварительного принятия решений по дальнейшим сторонам задачи, таким как выбор площадки и мощность станции. Для определения лучшего пункта размещения электростанции формулируется многокритериальная задача с выделением двух уровней альтернатив – пунктов размещения и вариантов реализации электростанции. Ввиду различающихся условий анализа на каждом из двух уровней, предлагается использовать два метода многокритериального анализа. Методика двухуровневого многокритериального анализа альтернатив, разработанная с участием автора, предполагает использование двух методов многокритериального анализа: нахождения многокритериальной полезности и анализа иерархий, который весьма удобен в использовании и имеет широкую практическую апробацию на реальных задачах принятия решений, однако его использование предполагает «одномоментное», априорное мысленное структурирование предпочтений принимающего решение лица в отношении альтернатив, критериев оценки. В случаях, когда принимающее решение лицо считает, что наилучшей стратегией решения задачи многокритериального выбора являлось бы постепенное выделение недоминируемых альтернатив и отсеивание доминируемых, метод анализа иерархий целесообразно заменить. В настоящей статье основное внимание уделено применяемому на втором уровне анализа методу ELECTRE I – первому методу из семейства пороговых методов ELECTRE. Приводится пример выбора пункта размещения тепловой электростанции в районе с децентрализованным электроснабжением. С этой целью определяются цели и критерии задачи выбора на двух уровнях анализа. Приводится описание критериев, характеризующих цели, а также описание каждого пункта размещения тепловой электростанции. Далее анализ проводится при помощи методов MAUT и ELECTRE I. В завершение обсуждаются полученные результаты, рассматривается влияние отдельных факторов на результат сравнения.

Ключевые слова: системный анализ в энергетике, многокритериальность, многокритериальная теория полезности, пороговый метод многокритериального анализа, размещение электростанции, децентрализованное электроснабжение

Информация о статье: Дата поступления 09 сентября 2019 г.; дата принятия к печати 27 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2019 г.

Для цитирования: Панкратьев П.С. Поддержка принятия решения о выборе пункта строительства тепловой электростанции на основе порогового метода многокритериального анализа. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 6. С. 1155–1164. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1155-1164

Support of decision-making on TPP construction site selection based on the threshold method of multicriteria analysis

Pavel S. Pankratiev
Bratsk State University, Bratsk, Russia

Abstract: The purpose of this article is to consider the problem of decision-making on the location of a thermal power plant in an area with decentralized power supply. The task of choosing the location of any power plant traditionally consists of two main stages – selection of the power plant location and the construction site. The last stage involves the

specification of the plant capacity. The first stage is the most difficult due to such factors as multi-criteria, a high degree of ambiguity of information, weak structuring. In particular, the location selection is complicated by the need for preliminary decision-making on further aspects of the problem including site selection and plant capacity. To determine the best location of the power plant a multi-criteria task is formulated with the allocation of two levels of alternatives – locations and implementation options of the power plant. As the analysis conditions differ on each of the levels it is proposed to use two methods of the multicriteria analysis. The methods of two-level multicriteria analysis of alternatives developed with the participation of the author involves the use of two methods of the multicriteria analysis. These are finding of the multicriteria utility and hierarchy analysis. The latter is easy to use and has a wide practical approbation on real decision-making problems but its application involves a "one-time", a priori mental structuring of preferences of the decision-maker in relation to alternatives and evaluation criteria. In cases when the decision-maker believes that the best strategy for solving the problem of multicriteria choice would be the gradual selection of non-dominant alternatives and elimination of dominant ones, the method of hierarchy analysis should be replaced. This article focuses on the ELECTRE I method used at the second level of analysis – it is the first method of the ELECTRE threshold method family. The article provides an example of choosing the location of a thermal power plant in the area with decentralized power supply. To this end, the objectives and criteria of the selection task are defined at two levels of analysis. The criteria characterizing the objectives are described as well as each location point of the thermal power plant. Further, the analysis is carried out using MAUT and ELECTRE I methods. In conclusion, the results are discussed, the effect of individual factors on the comparison result is considered.

Keywords: system analysis in power engineering, multicriteria, multicriteria utility theory, threshold method of the multicriteria analysis, power plant location, decentralized power supply

Information about the article: Received September 09, 2019; accepted for publication November 27, 2019; available online December 28, 2019.

For citation: Pankratiev PS. Support of decision-making on TPP construction site selection based on the threshold method of multicriteria analysis. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1155–1164. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1155-1164

1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно Энергетической стратегии России на период до 2030 года и Схеме территориального планирования Российской Федерации, в области энергетики в перспективе на ближайшие годы темпы ввода новых генерирующих мощностей сохранятся[1,2].

Выбор места размещения электростанции является сложной комплексной задачей, решение которой должно учитывать множество факторов. В работах [1–6] были приведены результаты предынвестиционных исследований по размещению гидроэлектростанции в условиях многокритериальности на основе разработанной методики двухуровневого многокритериального анализа альтернатив; дано обоснование использования указанной методики.

Особенностью задачи двухуровневого выбора места (пункта) размещения электростанции является различная степень детализации информации по критериям на первом и втором уровнях анализа [3–6]. При оценке альтернатив на первом уровне превалируют критерии с качественным измерением, при оценке на втором – с количественным измерением.

2. МЕТОДИКА АНАЛИЗА АЛЬТЕРНАТИВ

Описание разработанной с участием автора методики дано в [1–6]. Как видно, в настоящей методике для анализа альтернатив на первом уровне предполагается использовать метод анализа иерархий (AHP). Однако, принимающее решение лицо (ЛПР) может изъявить желание отбирать альтернативы поэтапно, отсеивая по одной или несколько на каждом этапе анализа, каждый раз анализируя оставшиеся альтернативы и тщательно их сравнивая. С точки зрения ЛПР, такой подход наиболее рационален и ему удобен; по его мнению, это избавляет от необходимости держать в

[1]Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. М.: ГУ ИЭС, 2010. 184 с.
[2]Об утверждении схемы территориального планирования Российской Федерации в области энергетики: распоряжение № 1634-р от 01.08.2016 г., изм. 25.07.2019.

голове всю информацию сразу по имеющимся альтернативам и критериям, нет необходимости «единовременно» (как бы априорно, до начала работы с методом) мысленно структурировать все свои предпочтения, что может вызвать ошибки, особенно при сравнительно большом числе критериев и альтернатив; вместо этого можно производить анализ поэтапно, исключая одну альтернативу за другой, уделяя максимум внимания оставшимся альтернативам. В этом случае метод, используемый на первом уровне АНР, может быть заменен. Весьма привлекательным в данном случае является использование порогового метода многокритериального анализа, например, из семейства методов ELECTRE. В отличие от так называемой американской научной школы, существующей среди методов принятия решений, французская школа имеет эвристическое, поведенческое, а не математическое обоснование. Семейство методов ELECTRE, предложенных французскими учеными, следует рассматривать в рамках так называемого конструктивистского подхода [7, 8]. Этот подход основан на предположении формирования предпочтений ЛПР в ходе решения задачи принятия решений [9].

Метод ELECTRE, также как и АНР, хорошо подходит для анализа альтернатив, оценки по которым могут быть заданы как количественно, так и качественно. Следует отметить, что при необходимости метод АНР также можно было бы использовать в поставленных условиях, однако в этом случае его предстояло было бы должным образом модернизировать. В настоящей статье акцент будет дан на использование на первом уровне анализа метода ELECTRE I – первого метода из семейства пороговых методов ELECTRE.

3. АНАЛИЗ РАЙОНА РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

Тепловые электростанции (ТЭС) на сегодняшний день являются наиболее распространенным типом электростанций в России [9, 10]. Ввиду большого количества разведанных и разрабатываемых месторождений каменного и бурого углей ожидается, что строительство таких электростанций по-прежнему будет продолжаться[1,2].

Для проведения исследования был выбран район с децентрализованным электроснабжением в Момском улусе, Республика Саха (Якутия) (рис. 1), в котором намечено три пункта строительства тепловой электростанции (П1-П3) вблизи от реки Индигирки.

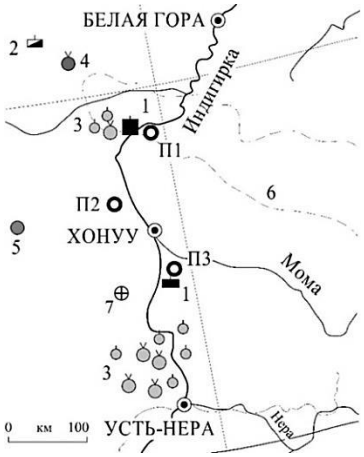


Рис. 1. Ситуационный план района размещения: 1 – месторождения каменного угля; 2 – месторождение бурого угля; 3 – месторождение золота; 4 – месторождение олова; 5 – месторождение драгоценных цветных камней; 6 – перспективная нефтегазовая область; 7 – центр электропотребления

Fig. 1. Site layout plan: 1 – coal deposits; 2 – brown coal deposits; 3 – gold fields; 4 – tin deposits; 5 – deposit of precious colored stones; 6 – promising oil and gas region; 7 – center of power consumption

На станции планируется выработка только электрической энергии за счет использования теплоты, полученной при сжигании углей (станция конденсационного типа), и передача ее по линиям электропередачи до потребителей. Исследование, посвященное размещению тепловой станции в этом районе при помощи методов многокритериальной полезности (MAUT) и AHP, было проведено в исследовании [6]. Разъяснения по перспективам каждого намеченного пункта также приведены в [6].

4. ФОРМИРОВАНИЕ ИЕРАРХИИ ЦЕЛЕЙ И КРИТЕРИЕВ

Для проведения анализа необходимо определить цели и критерии задачи, для этого строится соответствующая иерархия. При построении иерархии целей и критериев необходимо использовать такие показатели, которые наиболее полно позволяют оценить имеющиеся альтернативы. При этом перечень критериев при необходимости может быть расширен или, наоборот, сужен – в зависимости от требуемой степени детализации поставленной задачи.

Рассмотрим пример выбора пункта размещения ТЭС в предынвестиционной фазе в условиях определенности, используя разработанную с участием автора методику. Пример иерархии целей и критериев для задачи выбора пункта размещения тепловой электростанции, а также все соответствующие разъяснения к ней были представлены в [6]. Отметим лишь незначительные изменения в структуре иерархии, связанные с желанием ЛПР ориентировочно оценить степень надежности электроснабжения относительно каждого пункта строительства. Данное обстоятельство учтено следующим.

Цель «Максимизация надежности электроснабжения» характеризуется критерием К7 «Расстояние до центра электропотребления». Для оценки надежности системы в целом необходимо установить условия ее функционирования, а также учесть особенности эксплуатации[3].

В этой связи оценить степень надежности энергоснабжения при помощи общепринятых показателей (таких, например, как параметр потока отказов, наработка на отказ и др.) возможно при наличии сведений об основном оборудовании, планируемом для ввода на станции, а также статистической базы событий (отказов) для каждого элемента системы. На предынвестиционной же стадии анализа, в период предпроектных исследований, когда номенклатура основного энергетического оборудования станции еще не сформирована, вопросы надежности работы системы (станции, оборудования) могут рассматриваться лишь в ограниченной степени. На данном этапе анализа, учитывая имеющуюся исходную информацию, ориентировочно оценить надежность электроснабжения в пунктах П1-П3 предлагается по принципу «энергоисточник вблизи центра потребления повышает надежность энергоснабжения» [10–14]. Таким образом, пункт, находящийся ближе всего к центру нагрузок, получит максимальный балл по соответствующему критерию.

5. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ АЛЬТЕРНАТИВ ПЕРВОГО УРОВНЯ МЕТОДОМ ELECTRE I

Сравнение альтернатив на втором уровне (анализа площадок размещения) было произведено ранее методом MAUT; результаты анализа представлены в [6]. Как уже было отмечено, метод ELECTRE I предложен как альтернативный методу AHP для анализа альтернатив на первом уровне в случаях, когда лучшей стратегией анализа альтернатив было бы отсеивание доминируемых альтернатив одной за другой, уделяя отдельное внимание оставшимся (недоминируемым) альтернативам и проводя дальнейший анализ более тщательно. Кратко опишем последователь-

[3]Осика Л.К. Инжиниринг объектов интеллектуальной энергетической системы. Проектирование. Строительство. Бизнес и управление: практ. пособ. М.: Изд. дом МЭИ, 2014. 780 с.

ность действий при применении метода ELECTRE I.

Метод ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la Realité, исключение и выбор, отражающие реальность), разработанный Б. Руа, является исторически первым методом, появившимся в рамках порогового подхода[4] [7, 15].

В ELECTRE I варианты ранжируются по принципу сильного превосходства одного из вариантов либо безразличия. Сначала из рассмотрения удаляются все доминируемые варианты, а для оставшихся – проверяется справедливость утверждения по ограниченной предпочтительности одного из вариантов.

Процесс отбора лучших вариантов связан с появлением индексов согласия и несогласия. Индекс согласия (конкорданса) с гипотезой о превосходстве варианта A_i над A_j определяется отношением сумм показателей важности критериев (1):

$$c_{ij} = c(A_i, A_j) = \left(\sum_{l \in L^+} w_l + \sum_{l \in L^=} w_l \right) \Big/ \sum_{l=1}^{n} w_l , \quad (1)$$

где w_l – вес l-го критерия; L^+ и $L^=$ – подмножества множества L-критериев оценки альтернатив, по которым устанавливается отношение доминирования и равноценности, соответственно, между альтернативами A_i и A_j.

Индекс согласия c_{ij} характеризует соотношение критериев, по которым первый вариант настолько же хорош как и второй или не хуже второго, и второй вариант лучше первого[4] [15].

Индекс несогласия (дискорданса) d_{ij} с гипотезой о превосходстве варианта A_i над A_j определяется как относительная разность оценок по самому неблагоприятному критерию: для каждого критерия из подмножества $l \in L^-(x_{il}, x_{jl})$ вычисляются разности значений критерия для альтернатив x_{il}, x_{jl}. Полученное значение делится на длину шкалы этого критерия, после чего в качестве индекса несогласия принимается наибольшее из относительных значений (2):

$$d_{ij} = d(A_i, A_j) = \max_{l \in L^-} (x_{il} - x_{jl}) \Big/ M , \quad (2)$$

где $M = \max_l M_l$, $M_l = x_l^{\max} - x_l^{\min}$ – длина шкалы l-го критерия равная максимальной разности оценок по этому критерию.

Для ранжирования вариантов ЛПР задает два пороговых значения $c_1 > 0$ и $d_1 > 0$ для индексов согласия и несогласия. Если $c_{ij} \geq c_1$ и $d_{ij} \leq d_1$, то вариант A_i превосходит вариант A_j. Заданные пороговые уровни c_1 и d_1 выделяют в первое ядро X_1 предпочтительных вариантов, содержащее недоминируемые варианты[4].

После этого вводятся новые пороговые уровни, которые уменьшают порог согласия $c_2 < c_1$ и увеличивают порог разногласия $d_2 < d_1$, в результате чего происходит сужение множества недоминируемых вариантов и выделяется новое ядро X_2. И далее процедура сужения продолжается, пока в самое последнее ядро не войдут «непредпочтительные» и совершенно непохожие варианты.

Таким образом, задавая уровни согласия и несогласия, можно получить последовательность сужающихся ядер X_1, X_2, …, X_t, которая определит нестрогую ранжировку вариантов по отношению к ограниченной предпочтительности.

Вес каждого критерия в методе ELECTRE I может быть назначен как равный количеству голосов, отданным за важность («да»/«нет») каждого из них членами экспертной комиссии [7, 16]. Веса критериев для рассматриваемого примера определены следующие: $w_1 = 7$, $w_2 = 5$, $w_3 = 1$, $w_4 = 3$, $w_5 = 7$, $w_6 = 4$, $w_7 = 2$.

Далее аналитиком создаются вербальные оценки по шкале каждого качественно оцениваемого критерия, они представлены в табл. 1.

Таким образом, длины шкал по критериям будут принимать следующие значения: $M_1 = 1000$, $M_2 = 1000$, $M_3 = 3$, $M_4 = 4$, $M_5 = 4$, $M_6 = 5$, $M_7 = 3$. Поскольку по крите-

[4]Петровский А.Б. Теория принятия решений: учебник. М.: ИЦ «Академия», 2009. 400 с.

Таблица 1

Вербальные шкалы оценок по критериям

Table 1

Verbal rating scales by criteria

Критерий	Вербальная оценка
К3. Условия строительства	1 – тяжелые
	2 – умеренные
	3 – благоприятные
К4. Воздействие на растительный и животный мир	1 – критическое
	2 – сильное
	3 – умеренное
	4 – отсутствует
К5. Мнение заинтересованных групп людей	1 – резко негативное
	2 – негативное
	3 – нейтральное
	4 – положительное
К6. Перспективы развития района	1 – отсутствуют
	2 – незначительные
	3 – средние
	4 – значительные
	5 – выдающиеся
К7. Расстояние до центра электропотребления	1 – менее 100 км
	2 – от 100 до 200 км
	3 – более 200 км

риям К1 и К2 оценка ценности задается в пределах от 0 до 1, длины шкал этих критериев для удобства дальнейших вычислений были преобразованы от 0 до 1000.

В результате проведенного анализа трех пунктов строительства электростанции П1-П3 по имеющимся семи критериям К1-К7 от ЛПР были получены следующие оценки пунктов по каждому критерию (табл. 2).

Далее по формулам (1) и (2), соответственно, определяются индексы согласия и несогласия с гипотезой о превосходстве альтернативы A_i над A_j. Результаты представлены в табл. 3, 4.

В соответствии с методом зададимся первыми уровнями согласия и несогласия: c_1 = 24/29, d_1 = 0,245. Как легко убедиться исходя из данных, представленных в табл. 4, 5, что при заданных уровнях ограничений не нашлось ни одной альтернативы, превосходящей любую другую; альтернативы являются несравнимыми при заданных ограничениях.

Таблица 2

Многокритериальные оценки альтернатив

Table 2

Multi-criteria estimates of alternatives

Пункт строительства ТЭС	Критерии оценки пунктов строительства ТЭС						
	К1	К2	К3	К4	К5	К6	К7
П1	1000	334	2	2	1	3	3
П2	771	400	1	4	4	2	2
П3	755	167	3	3	3	4	1

ISSN 1814-3520

Таблица 3

Индексы согласия

Table 3

Concordance indices

Пункт	П1	П2	П3
П1	–	12/29	14/29
П2	17/29	–	24/29
П3	17/29	5/29	–

Таблица 4

Индексы несогласия

Table 4

Discordance indices

Пункт	П1	П2	П3
П1	–	0,75	0,5
П2	0,333	–	0,667
П3	0,245	0,333	–

Ослабим уровни ограничений: c_2 = 17/29, d_2 = 0,333. В результате получим следующие соотношения доминирования между альтернативами (рис. 2).

Из рис. 2 следует, что альтернативы П2 и П3 доминируют альтернативу П1 при текущих ограничениях. Пункты П2 и П3 являются несравнимыми и образуют первое ядро. Ослабим уровни ограничений: c_3 = 14/29, d_3 = 0,5. Тогда отношения доминирования между альтернативами будут представлены следующим графом (рис. 3).

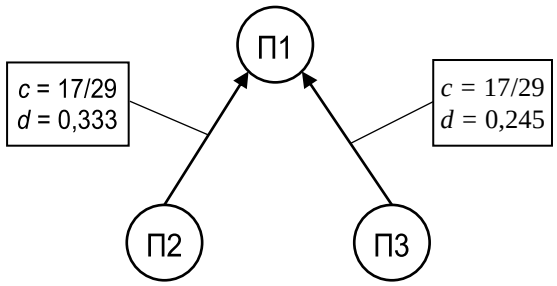


Рис. 2. Граф задачи принятия решений при уровнях ограничений: c_2 = 17/29; d_2 = 0,333
Fig. 2. Decision-making problem graph at indices: c_2 = 17/29; d_2 = 0.333

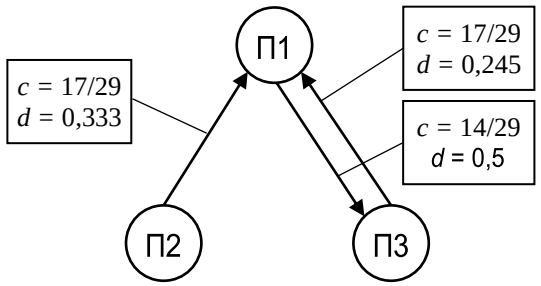


Рис. 3. Граф задачи принятия решений при уровнях ограничений: c_2 = 14/29; d_2 = 0,5
Fig. 3. Decision-making problem graph at indices: c_2 = 14/29; d_2 = 0.5

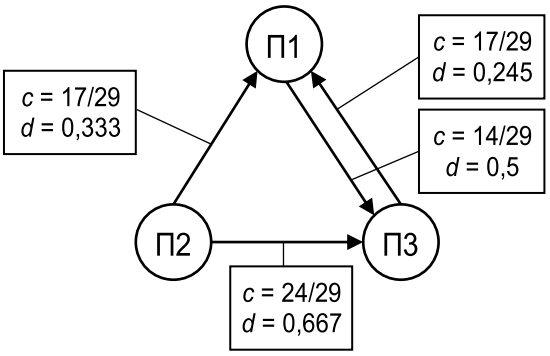


Рис. 4. Граф задачи принятия решений при уровнях ограничений: $c_2 = 12/29$; $d_2 = 0,667$
Fig. 4. Decision-making problem graph at indices: $c_2 = 12/29$; $d_2 = 0.667$

Как видно, добавилась только одна связь П1→П3 – образовался цикл между двумя альтернативами. Альтернатива П2 по-прежнему доминирует альтернативу П1. Убедимся в доминировании альтернативы П2 окончательно, дополнительно ослабив ограничения: $c_4 = 12/29$, $d_4 = 0,667$ (рис. 4).

Из рис. 4 следует, что альтернатива П2 доминирует все прочие альтернативы и признается наилучшей. Она будет образовывать второе ядро. Таким образом, получив ядра недоминируемых альтернатив, можно упорядочить все альтернативы по предпочтительности: П2→П3→П1.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог вышесказанного, с учетом предпочтений ЛПР, лучшим для размещения ТЭС был выбран пункт П2, т.к. имеет наименьшую стоимость строительства и наивысшие вербальные оценки по критериям К4, К5, К7. Пункт П1, получивший высшую оценку ценности по критерию мощности, оказался доминируемым остальными альтернативами, что является свидетельством того, что основные и наиболее важные факторы оценки альтернатив не всегда предопределяют принимаемые решения: в этом случае критерий мощности, являясь одним из самых важных критериев оценки альтернатив, не определил первенства пункта П1.

В данной статье было показано применение разработанной с участием автора методики многокритериального двухуровневого анализа пунктов размещения электростанций с использованием двух методов многокритериального анализа MAUT и ELECTRE I к тепловым станциям в изолированных районах с децентрализованным электроснабжением. Было показано, таким образом, что разработанная методика может быть также применена в указанных условиях для тепловых станций на предынвестиционной стадии анализа. Пороговый подход к принятию решений с применением метода из семейства методов ELECTRE может быть весьма полезен в тех случаях, когда ЛПР находит целесообразным поэтапно исключать доминируемые альтернативы из анализа, тщательно сравнивая оставшиеся.

Библиографический список

1. Шакиров В.А., Панкратьев П.С. Многокритериальный двухуровневый подход к выбору лучшей альтернативы в рамках слабоструктурированной проблемы // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2013. № 2. С. 118–127.
2. Шакиров В.А., Панкратьев П.С. Поддержка принятия решений на стадии предпроектных исследований на основе двухуровневого многокритериального анализа // Прикладная информатика. 2013. № 6. С. 111–121.
3. Шакиров В.А., Панкратьев П.С. Выбор пункта строительства электростанции в условиях риска методом анализа иерархий // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 4. С. 141–147.
4. Панкратьев П.С., Шакиров В.А. Двухуровневый многокритериальный анализ пунктов строительства

ISSN 1814-3520

гидроэлектростанции // Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 5. С. 385–390.
5. Шакиров В.А., Панкратьев П.С. Методика многокритериального двухуровневого анализа пунктов размещения электростанций // Искусственный интеллект и принятие решений. 2017. № 1. С. 69–83.
6. Панкратьев П.С. Размещение тепловой электростанции в районе с децентрализованным электроснабжением в условиях многокритериальности с учетом неточно выраженных предпочтений ЛПР // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 2. С. 320–334. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-320-334
7. Ларичев О.И., Анич И. Метод ЭЛЕКТРА и проблема ацикличности отношений альтернатив // Автоматика и телемеханика. 1996. № 8. С. 108–118.
8. Roy B. Multicriteria Methodology for Decision Aiding. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. 293 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2500-1
9. Баринов В.А. Перспективы развития электроэнергетики России на период до 2030 г. // Кабели и провода. 2010. № 3. С. 13–20.
10. Осика Л.К. Управление инвестпроектами строительства ТЭС. Прединвестиционная фаза. М.: Вершина, 2009. 344 с.
11. Keeney R. Siting Energy Facilities. New York: Academic Press, 1980. 432 p. https://doi.org/10.1016/C2013-0-10951-8
12. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях. Предпочтения и замещения: пер. с англ. / под ред. И.Ф. Шаханова. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.
13. Winterfeldt D., Fischer G.W. Multiattribute utility theory: Models and assessment procedures // Utility, probability and human decision making. Amsterdam: Reidel, 1975. P. 47–85.
14. Белобров В. Анализ динамики стоимости строительства ТЭС в мире // Энергорынок. 2009. № 11. С. 64–67.
15. Рыков А.С. Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации. М.: Изд. дом МИСиС, 2009. 607 с.
16. Блейр Д.Х., Поллак Р.Э. Рациональный коллективный выбор // В мире науки. 1983. № 10. С. 57–65.

References

1. Shakirov VA, Pankratiev PS. Two level multi-criteria approach to choosing the best alternative within a semistructured problem. *Vestnik Voronejskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informacionnye tehnologii* = Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies. 2013;2:118–127. (In Russ.)
2. Shakirov VA, Pankratiev PS. Decision making support at the pre-feasibility study stage based on two level multi-attribute analysis. *Prikladnaya informatika* = Applied Informatics. 2013;6:111–121. (In Russ.)
3. Shakirov VA, Pankratiev PS. A choice of the power plant construction site location under conditions of risk with analytic hierarchy process. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* = Modern Technologies. System analysis. Modeling. 2014;4:141–147. (In Russ.)
4. Pankratiev PS, Shakirov VA. Two-level multiattribute analysis of hydroelectric station sites. *Informacionnye tehnologii* = Information Technologies. 2015;21(5):385–390. (In Russ.)
5. Shakirov VA, Pankratiev PS. Technique of multi-attribute two-level analysis of power plant sites. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii* = Artificial Intelligence and Decision-Making. 2017;1:69–83. (In Russ.)
6. Pankratiev PS. Thermal power plant location in the region with decentralized power supply under multi-attribute conditions considering imprecisely expressed preferences of decision makers. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(2):320–334. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-320-334
7. Larichev OI, Anich I. The ELEKTRA method and the problem of acyclicity of relations of alternatives. *Avtomatika i telemehanika* = Automation and Remote Control. 1996;8:108–118. (In Russ.)
8. Roy B. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 1996. 293 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2500-1
9. Barinov VA. Development prospects of the Russian electric power industry for the period until 2030. *Kabeli i provoda* = Cables and Wires. 2010; 3:13–20. (In Russ.)
10. Osika LK. *Management of TPP construction investment projects. Pre-investment phase.* Moscow: Vershina; 2009. 344 p. (In Russ.)
11. Keeney R. Siting Energy Facilities. New York: Academic Press; 1980. 432 p.
12. Keeney RL, Raiffa H. *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. New York: Wiley; 1976, 569 p. (Russ. ed: Prinyatie reshenij pri mnogih kriteriyah. Predpochteniya i zameshcheniya. Moscow, Vershina, 2009, 344 p.)
13. Winterfeldt D., Fischer G.W. Multiattribute utility theory: Models and assessment procedures. Utility, probability and human decision making. Amsterdam: Reidel; 1975:47–85.
14. Belobrov V. Analysis of the global dynamics of constructions cost of thermal power plants. *Energorynok* = Energy Market. 2009;11:64–67.
15. Rykov AS. *System analysis: models and methods of decision making and search engine optimization*. Moscow: MISiS; 2009. 607 p.
16. Blair DH, Pollack RE. Rational collective choice. *V mire nauki* = Scientific American. 1983;10:57–65. (In Russ.)

Критерии авторства

Панкратьев П.С. получил и оформил научные результаты и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Authorship criteria

Pankratiev P.S. 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

Панкратьев Павел Сергеевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленной теплоэнергетики,
Братский государственный университет,
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Россия;
✉ e-mail: scud33@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pavel S. Pankratiev,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Industrial Thermal Engineering,
Bratsk State University,
40, Makarenko St., Bratsk 665709, Russia,
✉ e-mail: scud33@inbox.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.311
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1165-1174

Разработка методики рационального использования водных ресурсов Ангаро-Енисейского каскада гидроэлектростанций

© В.И. Пантелеев, С.С. Труфакин
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме: Целью статьи является разработка методики планирования долгосрочных режимов Ангаро-Енисейского каскада гидроэлектростанций, обеспечивающих максимальный эффект от использования электроэнергии в электроэнергетической системе и минимальные риски нарушения требований остальных водопользователей. Рассмотрена стохастическая оптимизация с использованием методики расчета водно-энергетического режима гидроэлектростанций и расчета установившегося режима электрических сетей. Разработана методика планирования долгосрочных водно-энергетических режимов гидроэлектростанции и оптимизационная модель, минимизирующая целевую функцию, состоящую из рисков нарушения требования различных водопользователей и отклонения экономического эффекта от максимального значения. Сделаны расчеты режимов работы гидроэлектростанции для притоков различной обеспеченности, произведен анализ результатов. Проведенные расчеты оптимальных режимов работы гидроэлектростанции свидетельствуют об эффективности методики и оптимизационной модели.

Ключевые слова: гидроэлектростанция, оптимизация режимов, водопользование, каскад гидроэлектростанций, режим гидроэлектростанций, водно-энергетический режим

Информация о статье: Дата поступления 22 октября 2019 г.; дата принятия к печати 19 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2019 г.

Для цитирования: Пантелеев В.И., Труфакин С.С. Разработка методики рационального использования водных ресурсов Ангаро-Енисейского каскада гидроэлектростанций. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2019. Т. 23. № 6. С. 1165–1174. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1165-1174

Developing methodology for rational use of Angara-Yenisei cascade HPP water resources

Vasiliy I. Panteleev, Sergey S. Trufakin
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: The purpose of the article is to develop a methodology for planning long-term regimes of the Angara-Yenisei cascade of hydroelectric power plants providing the maximum effect from the use of electric energy in the electric power system and minimal risks of violating requirements of other water users. Consideration is given to the stochastic optimization with the use of the calculation method of HPP water-energy mode and calculation of the steady-state mode of electric networks. The planning methodology of long-term water and energy regimes of a hydroelectric power station and an optimization model minimizing the target function consisting of risks of violation of various water user requirements and deviation of the economic effect from the maximum values are developed. The HPP operation modes are calculated for tributaries of various supply, the obtained results are analyzed. The performed calculations of the optimal operation modes of the hydroelectric power plant prove the effectiveness of the methodology and the optimization model.

Keywords: hydro power plant (HPP), regime optimization, water use, HPP cascade, HPP regime, water-energy regime

Information about the article: Received October 22, 2019; accepted for publication November 19, 2019; available online December 28, 2019.

For citation: Panteleev VI, Trufakin SS. Developing methodology for rational use of Angara-Yenisei cascade HPP water resources. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1165–1174. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1165-1174

1. ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей для гидроэлектростанций (ГЭС) является выбор их оптимального режима работы. Заблаговременное определение и планирование выработ-

ки электроэнергии ГЭС необходимо для повышения экономической эффективности работы, обеспечения надежности работы электроэнергетических систем и более рационального использования водных ресурсов. Все это является основным условием, соблюдение которого дает возможность выполнения предъявляемых современным электроэнергетическим и водохозяйственным комплексам требований.

Для электроэнергетических систем восточных регионов Российской Федерации характерной является ситуация, в которой темпы освоения гидроэнергетического потенциала существенно превзошли рост развития энергоемкой промышленности. Вследствие чего (с целью вынужденного пропуска воды по всему каскаду ГЭС, например, для целей навигации или пропуска паводка) наблюдается высокий уровень выработки электроэнергии Ангаро-Енисейского каскада ГЭС. Несмотря на возможность водохранилищ многолетнего регулирования аккумулировать сток, возникает проблема передачи электроэнергии ГЭС в западную часть энергосистемы [1, 2], связанная с недостаточной пропускной способностью линий электропередач системообразующей сети 500 кВ, особенно во время проведения ремонтной кампании объектов электросетевого хозяйства.

Учитывая вероятностную природу стока, система заблаговременного определения выработки электроэнергии ГЭС, планирования графика ремонтов объектов электросетевого хозяйства и определения показателей баланса электроэнергии и мощности должна учитывать возможность наступления любого притока воды в водохранилища ГЭС и вырабатывать решения на основании показателей комплексной эффективности всех зависящих технологических процессов.

Традиционно на этапах долгосрочного планирования балансов электроэнергетических систем применяются подходы и методики, основанные на детерминированном представлении исходных данных и решений. При таком подходе выбирается несколько вариантов исходных данных, и определяются оптимальные загрузки электростанций, а также другие режимные показатели. Этому подходу посвящены работы таких авторов как Е.В. Цветков, Т.А. Филиппова, В.М. Горнштейн, М. Перейра, R. Феррейро и др. [3–10]. При таком подходе степень учета вероятностной природы стока определяется количеством использованных вариантов исходных данных. Поэтому при определении обоснованных решений, учитывающих вероятностную природу стока, возникает проблема большой размерности задачи.

Из работ, рассматривающих вероятностную природу стока, можно отметить труды, основанные на использовании деревьев в условиях функционирования систем (сценарных деревьев) А.М. Клера, П.Ю. Елсукова, Е.С. Финарди, Э.Л. да Силва и др. [11, 12]. Сценарные деревья могут порождать оптимизационные задачи весьма большой размерности – с тысячами и десятками тысяч оптимизируемых параметров, поэтому в данных работах в дополнение рассматриваются методы декомпозиции, уменьшающие размерность задач. Решая задачу учета вероятностной природы стока, и в некоторой степени – задачу большой размерности, методы, основанные на использовании сценарных деревьев в сочетании с методами декомпозиции, не решают задачу согласованности технологических ограничений или требований к режимам работы ГЭС со стороны различных водопользователей. Например, в существующей ситуации высокого уровня выработки электроэнергии ГЭС в условиях пропуска воды для целей навигации в период проведения ремонтной кампании объектов электросетевого хозяйства остается неразрешенным вопрос: какие именно требования необходимо соблюдать, и в какой степени, если они несопоставимы друг с другом?

В рамках направления по согласованию стратегий водопользователей в работах В.И. Данилов-Данильяна, И.Л. Хранович, Йан Си, Ксианг Ли [13, 14] представлена модель учета вероятностной природы стока, основанная на методологии гаранти-

рованного водопользования и на построении зависимостей эффективности использования водных ресурсов от вероятности притоков воды. Приток воды в водохранилища ГЭС в такой модели представлен характеристикой распределения вероятностей. Применяя предложенные функции, возможно определять показатели эффективности без применения моделей большой размерности. Основной недостаток этой методики в сложности описания зависимостей эффективности, основанных на полном знании о получении эффекта в конкретной отрасли от использования водных ресурсов. Поэтому ее целесообразней использовать для целей проектирования, а не управления режимами работы ГЭС, т.к. при управлении данным режимом необходимо исходить из уже определенных требований водопользователей, выраженных в конкретных показателях, например: расходы воды, уровни воды или перетоки мощности в электрической сети.

На основании представленной актуальности и недостатков существующих систем планирования режимов работы ГЭС, целью исследования является разработка методики планирования долгосрочных водно-энергетических режимов ГЭС, обеспечивающей максимальный эффект от использования электроэнергии в электроэнергетической системе и минимальные риски нарушения требований остальных водопользователей, определенные на основании методологии гарантированного водопользования.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика планирования долгосрочных режимов гидроэлектростанций разработана на основании методов стохастической оптимизации. В связи с множеством критериев оптимальности изначально постановка задачи является многокритериальной. Для достижения оптимального результата, характеризующего получение равного эффекта от режимов работы ГЭС для всех водопользователей, многокритериальная проблема преобразована в задачу скалярной оптимизации посредством проекции всех показателей эффективности на единое поле показателей. Оптимальным представляется такое решение, при котором все риски нарушения требований водопользователей, а также отклонение экономического эффекта от наиболее выгодного, являются минимальными. Подробные характеристики оптимизационной модели представлены в работе [15].

Важным аспектом в методике является способ описания функций эффективности для различных водопользователей. Для эксплуатирующей организации ГЭС максимальный эффект достигается при максимальной прибыли от продажи электроэнергии. Остальные водопользователи предъявляют требования для поддержания режимных параметров в определенные периоды времени. В детерминированных моделях оптимизации обычно такие требования преобразуются в систему ограничений. Однако, в связи со стохастической природой притока воды в водохранилища, детерминированные модели подходят только для планирования краткосрочных режимов ГЭС. Для долгосрочного планирования режимов работы ГЭС целесообразнее применять стохастические модели, учитывающие возможность наступления любого притока воды в водохранилища ГЭС. В стохастических моделях показателями эффективности водопользователей, предъявляющей требования поддержания параметров, являются риски нарушения этих требований. В рамках исследования разработана методика расчета рисков нарушения требований различных водопользователей, основанная на методологии гарантированного водопользования. Подробное описание методики представлено в работе [16].

Для расчета целевой функции необходимо на каждом шаге итерационного процесса рассчитывать режим работы ГЭС. Для этого применяются классические методики водно-энергетического расчета гидроэлектростанций [17, 18] и методики расчета установившегося режима электрической сети. В качестве модели электриче-

ской сети для расчета перетоков мощности или электроэнергии в ветвях модели для целей долгосрочного планирования приняты линейные уравнения установившегося режима. Основным методом их решения является метод Гаусса.

В связи со сложностью топологии электрической сети энергосистем, в которых функционируют крупные каскады ГЭС, разработана методика расчета рисков нарушения балансовых требований энергосистемы, выраженная в требованиях непревышения максимальных перетоков мощности в различных сечениях электрической сети. Методика основана на расчете матриц чувствительности. Подробное описание методики представлено в работах [19, 20].

На основании изложенных методик и разработок зарегистрирована программа для ЭВМ «Программа расчета оптимальных режимов гидроэлектростанций Ангаро-Енисейского каскада» № 2019661972 от 12.09.2019.

В качестве завершающего этапа исследования проведем оптимизационные расчеты режимов работы ГЭС Ангаро-Енисейского каскада для различных объемов притоков воды в водохранилища, соответствующих гидрографам со стандартными значениями обеспеченности 95%, 90%, 75%, 50%, 25%, 10% и 5%.

3. ОПИСАНИЕ УСЛОВИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АНГАРО-ЕНИСЕЙСКОГО КАСКАДА ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Ангаро-Енисейский каскад ГЭС находится на реках Ангара и Енисей, схема расположения изображена на рис. 1. В связи с тем, что р. Ангара впадает в р. Енисей, режимы работы всех ГЭС, расположенных на этих реках, связаны общим гидрологическим режимом.

Помимо общности гидрологического режима ГЭС Ангаро-Енисейского каскада связаны электроэнергетическим режимом, функционируя в составе объединенной энергетической системы Сибири, упрощенная структурная схема которой изображена на рис. 2. На рис. 2 обозначены: Иркутская ГЭС (ИрГЭС), Братская ГЭС (БрГЭС), Усть-Илимская ГЭС (УИГЭС), Богучанская (ГЭС), Красноярская ГЭС (КГЭС), Саяно-Шушенская



Рис. 1. Схема расположения Ангаро-Енисейского каскада гидроэлектростанций
Fig. 1. Location diagram of Angara-Yenisei cascade of hydroelectric power stations

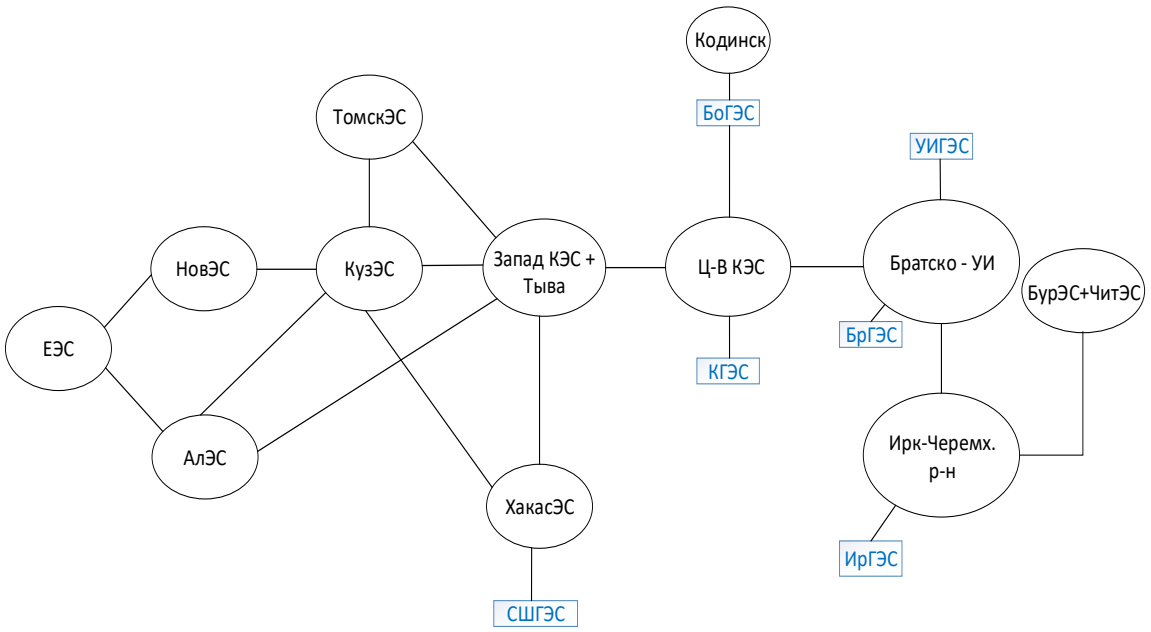


Рис. 2. Упрощенная структурная схема электроэнергетической системы Сибири с выделением расположения гидроэлектростанций Ангаро-Енисейского каскада
Fig. 2. Simplified structural diagram of Siberian power system with marked locations of Angara-Yenisei cascade HPP

ГЭС (СШГЭС), энергосистема Республики Бурятия (БурЭС), энергосистема Забайкальского края (ЧитЭС), Иркутско-Черемховский район (Ирк.-Черемх. р-н) и Братско-Усть-Илимский район (Братско-УИ) энергосистемы Иркутской области, Западный район (Запад КЭС) и Центрально-Восточный район (Ц-В КЭС) энергосистемы Красноярского края, энергосистема Республики Тыва (Тыва), энергосистема Республики Хакасия (ХакасЭС), энергосистема Кемеровской области (КузЭС), энергосистема Томской области (ТомскЭС), энергосистема Республики Алтай и Алтайского края (АлЭС), энергосистема Новосибирской области (НовЭС), остальная часть Единой энергетической системы России (ЕЭС).

При управлении режимами работы ГЭС Ангаро-Енисейского каскада в течение года выделяют следующие характерные периоды.

1. Период весеннего половодья с первого мая по первое июля, для Иркутской ГЭС и Братской ГЭС – до первого августа. Характеризуется высокими значениями притока воды в водохранилища, в зависимости от которых принимаются различные решения. В общем случае в нормальной ситуации происходит наполнение водохранилищ при условиях навигационных расходов в нижний бьеф. При наполнении водохранилищ ГЭС в некоторых случаях существуют ограничения интенсивности наполнения, так, например, при наполнении или сработке водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС уровень водохранилища не должен превышать предельных значений.

2. Период летней межени с первого июля по первое августа. Характеризуется спадом приточности. В общем случае уровень водохранилищ стабилизируется при условиях навигационных расходов в нижний бьеф. Важной задачей на этом этапе является определение такого режима работы ГЭС, при котором на конец периода должен быть запас по водохранилищам для аккумуляции дождевого паводка.

3. Период дождевых паводков с первого августа по первое октября. Характеризуется повышенными притоками воды в водохранилища ГЭС. Зачастую объем дождевого паводка является непредсказуемым, поэтому превышение уровня водохранилищ, которые обеспечивают запас по водохранилищам для аккумуляции дождевого паводка, возможно только к концу периода.

4. Период зимней межени с первого октября по первое мая. Характеризуется небольшими притоками воды в водохранилища ГЭС. Поэтому в этом периоде срабатывается накопленный полезный объем водохранилищ обязательными навигационными расходами в период с первого октября по двадцать пятое октября и балансовыми расходами, рассчитанными для достижения к концу периода минимального уровня водохранилищ. Внутри этого временного интервала выделяют период ледостава, характеризующийся повышенными рисками затопления населенных пунктов, расположенных в нижнем бьефе ГЭС, и как следствие ограничениями максимального расхода воды.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В связи с тем, что полные результаты расчетов, как в графическом, так и в табличном виде достаточно объемные, выделим основные критические характеристики в результатах расчета и опишем их.

Результаты расчетов для притоков воды в водохранилища равным 90% и 95% обеспеченности показывают высокие риски нарушения требований водоснабжения г. Красноярск и требований водного транспорта на р. Енисей ниже Красноярской ГЭС. Это обусловлено особенностью планирования режимов работы Красноярской ГЭС, у которой первоначально в расчетах учтен минимальный уровень водохранилища Красноярской ГЭС равный 230 м. Результат показывает, что при притоке воды, соответствующем 95% обеспеченности, отсутствует возможность обеспечения сработки водохранилища до минимальной отметки 230 м с учетом поддержания требуемого расхода воды для целей водного транспорта и водоснабжения. При притоке воды, соответствующем 90%, отсутствует возможность обеспечения сработки водохранилища до минимальной отметки 230 м с учетом поддержания требуемого расхода воды только для целей водного транспорта. Такой результат подтверждается правилами использования водных ресурсов Красноярского гидроузла, в котором указываются:

– необходимость приостановления навигации при условиях малой водности;

– возможность использования объема водохранилища в пределах отметок от 225 м до 230 м при условиях малой водности.

При условии сохранения требуемых объемов расходов воды со стороны водного транспорта и водоснабжения и сработки водохранилища Красноярской ГЭС до отметки ниже 230 м максимальные риски обеспечения требований водного транспорта для притока 95% обеспеченности составляют 2,298%, для притока 90% обеспеченности – 1,09%. Максимальные риски нарушения требований энергосистемы для притока 95% обеспеченности – 1,787%, для притока 90% обеспеченности – 2,763%. Отклонение расчетной выработки электроэнергии от максимальной для притока 95% обеспеченности составило 1,869 %, для притока 90% обеспеченности – 3,379%.

При высоком уровне притоков 10% и 5% обеспеченности (в связи с высокими рисками нарушения требований энергосистемы) необходимо осуществлять холостые сбросы:

– на Саяно-Шушенской ГЭС – для непревышения максимальных перетоков в сечении «Выдача мощности СШГЭС»;– на Братской, Усть-Илимской и Богучанской ГЭС – для непревышения максимальных перетоков в сечениях «Выдача мощности БоГЭС», «Тайшет, Ангара – Запад»;

– на Красноярской ГЭС – для непревышения максимальных перетоков в сечениях «Красноярская ГЭС – Назаровская ГРЭС», «Назаровское».

Анализ эффективности действия оптимизационной модели возможно провести на основании оценки оптимальных режимов работы Саяно-Шушенской ГЭС, представленных в виде графиков на рис. 3.

В условиях низкой приточности с обеспеченностью 75–95% оптимизационная модель реализует близкие к минимальным расходы в навигационный период (с мая по октябрь) для минимизации рисков

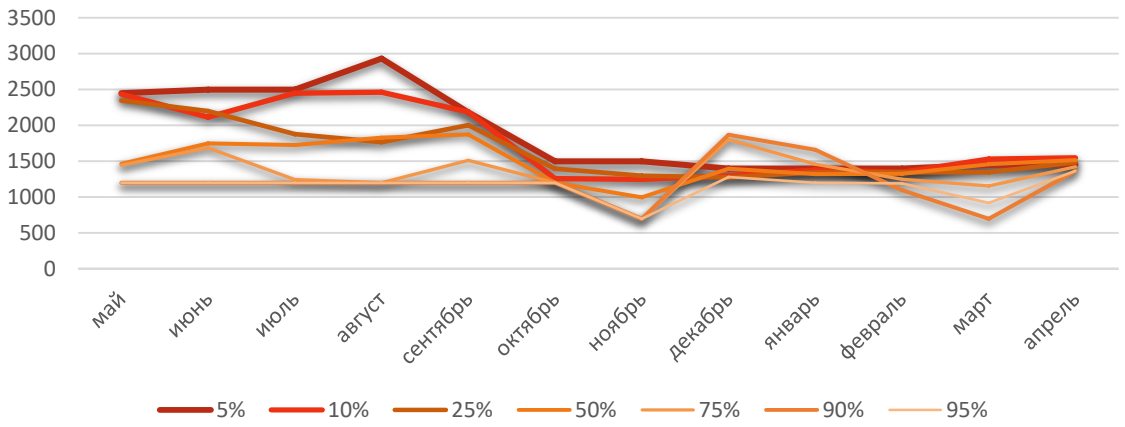


Рис. 3. Оптимальные режимы Саяно-Шушенской гидроэлектростанции
Fig. 3. Optimal modes of Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station

по требованиям водного транспорта и водоснабжения, а накопленный запас воды в основном расходуется в период с декабря по январь, характеризующийся максимальным потреблением в энергосистеме, для снижения рисков возникновения дефицита в энергосистеме.

В условиях средней и повышенной приточности 25–50% оптимизационная модель реализует компромиссные режимы, обеспечивающие минимальные риски нарушения требований в условиях заданной системы ограничений.

В условиях высокой приточности 5–10% оптимизационная модель увеличивает расходы воды в период с мая по август для снижения рисков превышения перетоков в сечении «Выдача мощности СШГЭС», в дополнение к этому в процессе расчета были добавлены холостые сбросы в период с июля по август. В период с сентября по апрель оптимизационная модель реализует равномерный расход для снижения рисков возникновения избытка в энергосистеме.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе оптимизационных вычислений математическая модель реализует такой режим работы ГЭС, при котором сумма рисков и отклонение суммарной выработки от оптимального значения, является минимальной. Из результатов показателей целевой функции можно сделать вывод, что при минимальном значении целевой функции составляющие могут отличаться друг от друга. Это может свидетельствовать о неравноправном распределении общей эффективности между участниками процесса, однако стоит сказать о наличии в оптимизационной функции системы ограничений. В условиях наличия системы ограничений оптимизационная модель сводит к минимуму отличия между составляющими целевой функции до момента выхода за допустимую область, и, т.к. период возникновения максимальных рисков по одним требованиям не совпадает с периодом возникновения максимальных рисков по другим требованиям, возникают вышеупомянутые отклонения.

Библиографический список

1. Совбан Е.А., Филиппова Т.А., Труфакин С.С. Разработка принципа управления электроэнергетическим режимом объединенной энергосистемы Сибири со значительной долей гидроэлектростанций // Электроэнергетика глазами молодежи: сб. тр. IX Междунар. молодеж. науч.-техн. конф. – 2018: в 3 т. (г. Казань, 01–05 октября 2018 г.). Казань: Изд-во КГЭУ, 2018. Т. 1. С. 186–189.

2. Русина А.Г., Совбан Е.А., Филиппова Т.А. Оптимальное использование ресурсов Новосибирской ГЭС в энергосистеме // Электроэнергетика глазами молодежи: сб. тр. V Междунар. молодеж. науч.-техн. конф. (г. Томск, 10–14 ноября 2014 г.). Томск: Изд-во ТПУ, 2014. С. 571–572.

3. Шарифуллин В.Н., Шарифуллин А.В., Мардиханов А.Х. Организация суточных режимов смешанной энергосистемы ТЭС-ГЭС в условиях свободного планирования нагрузки // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 7–8. С. 47–52.
4. Мардиханов А.Х. Оптимальное планирование ограничений мощности Нижнекамской ГЭС с учетом действующих и планируемых к изменению регламентов ОРЭМ // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2015. № 3. С. 21–31.
5. Феррero R.W., Rivera J.F., Shahidehpour S.M. Effect of deregulation on hydrothermal systems with transmission constraints // Electric Power Systems Research. 1996. Vol. 38. Issue 3. P. 191–197. https://doi.org/10.1016/S0378-7796(96)01084-X
6. Русина А.Г., Филиппова Т.А., Совбан Е.А., Худжасаидов Д.Х. Основы методики оценки использования ресурсов ГЭС при функционировании электроэнергетической системы // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 3. С. 426–434. https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-3-426
7. Nan Shi, Suquan Zhou, Xunwen Su, Rongfeng Yang, Xianhui Zhu. Unit commitment and multi-objective optimal dispatch model for wind-hydro-thermal power system with pumped storage // VIII International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia) (Hefei, 22–26 May 2016). Hefei: IEEE, 2016. P. 1489–1495. https://doi.org/10.1109/IPEMC.2016.7512512
8. Bortoni E.C., Bastos G.S., Ferreira T.V. V. Online optimal power distribution between units in a hydro power plant // General Meeting Conference & Exposition (National Harbor, 27–31 July 2014). National Harbor: IEEE; 2014, p. 1–5. https://doi.org/10.1109/PESGM.2014.6939061
9. Kate-singnoy W., Premrudeepreechacharn S. Age estimation of electrographite brush in generator system for optimized maintenance planning of Sirikit hydro power plant // North American Power Symposium (NAPS) (Pullman, 7–9 September 2014). Pullman: IEEE, 2014. P. 1–6. https://doi.org/10.1109/NAPS.2014.6965393
10. Sultonov Sh.M., Sekretarev Yu.A., Mitrofanov S.V. Implementation of the Method of Lagrange for Optimal Modes of Energy System of Tajikistan // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 698. P. 726–731. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.698.726
11. Cerejo da Silva A.J., Pinto Simoes Mariano S.L., Alves Calado M.R. Optimal Hydro-Wind Power Generation for Day-Ahead Pool Market // IEEE Latin America Transactions. 2015. Vol. 13. Issue 8. P. 2630–2636. https://doi.org/10.1109/TLA.2015.7332142
12. Клер А.М., Корнеева З.Р., Елсуков П.Ю. Оптимизация режимов работы энергосистем, включающих ТЭЦ и ГЭС с водохранилищами многолетнего регулирования // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2011. № 2. С. 92–106.
13. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования. М.: Научный мир, 2010, 232 с.
14. Yuan Si, Xiang Li, Dongqin Yin, Ronghua Liu, Jiahua Wei, Yuefei Huang, et al. Evaluating and optimizing the operation of the hydropower system in the Upper Yellow River: A general LINGO-based integrated framework // PLOS ONE. 2018. Vol. 13. Issue 1. P. e0191483. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191483
15. Труфакин С.С., Пантелеев В.И., Совбан Е.А., Русина А.Г. Оптимизация долгосрочных режимов ГЭС Ангаро-Енисейского каскада // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2018. № 2. С. 144–151.
16. Panteleev V.I., Trufakin S.S., Pilyugin G.A. Stochastic optimization of Modes of Hydroelectric Power Plants // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (Sochi, 25–29 March 2019). Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2019. P. 1–5. https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8743051
17. Труфакин С.С., Совбан Е.А., Русина А.Г. Разработка программного обеспечения «Водно-энергетический расчет ГЭС Ангаро-Енисейского каскада» // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 9–10. Р. 105–111.
18. Совбан Е.А., Тайникова М.В., Русина А.Г. Тестирование программного обеспечения «Водно-энергетический расчет ГЭС Ангаро-Енисейского каскада» // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч. (г. Новосибирск, 05–09 декабря 2016 г.). Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. Ч. 4. С. 72–74.
19. Пантелеев В.И., Труфакин С.С. Учет ограничений по электрической сети при планировании долгосрочных режимов гидроэлектростанций // Борисовские чтения: материалы II Всерос. науч.-техн. конф. памяти проф. В.Н. Борисова (г. Красноярск, 25–27 сентября 2019 г.). Красноярск: Изд-во КГТУ, 2019. С. 87–90.
20. Molin A., Sandberg H., Johansson M. A study on the sensitivity matrix in power system state estimation by using sparse principal component analysis // 55th Conference on Decision and Control (CDC) (Las Vegas, 12–14 December 2016). Las Vegas: IEEE, 2016. P. 1529–1535. https://doi.org/10.1109/CDC.2016.7798483

References

1. Sovban EA, Filippova TA, Trufakin SS. Development of electric power regime control principle of unified power system of Siberia with a significant share of hydroelectric power plants. In: *Elektroenergetika glazami molodezhi: sbornik trudov IX Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii – 2018* = Electric power industry through the eyes of youth: Collected works of IX International youth scientific and

technical conference. 01–05 October 2018, Kazan'. Kazan': Kazan State Power Engineering University; 2018, vol. 1, p. 186–189. (In Russ.)
2. Rusina AG, Sovban EA, Filippova TA. Optimal use of Novosibirsk hydroelectric power station resources in the energy system. In: *Elektroenergetika glazami molodezhi: sbornik trudov V Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii* = Electric power industry through the eyes of youth: Collected works of V International youth scientific and technical conference. 10–14 November 2014, Tomsk. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2014, p. 571–572. (In Russ.)
3. Sharifullin VN, Sharifullin AV, Mardikhanov AH. Optimization of daily modes of the mixed power supply system of thermo- hydroelectric power station in conditions of free planning loading. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki* = Power engineering: research, equipment, technology. 2014;7–8:47–52. (In Russ.)
4. Mardikhanov AH. Optimal planning of power limitations on Nizhnekamskaya HPP taking into account existing and planned changes regulation on the wholesale electricity market. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* = Vestnik KGEU. 2015;3:21–31. (In Russ.)
5. Ferrero RW, Rivera JF, Shahidehpour SM. Effect of deregulation on hydrothermal systems with transmission constraints. Electric Power Systems Research. 1996;38(3):191–197. https://doi.org/10.1016/S0378-7796(96)01084-X
6. Rusina AG, Filippova TA, Sovban EA, Khudzhasaidov DH. Basics of technique evaluation the use of hydroelectric resources in their work in eps. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2017;10(3):426–434. (In Russ.) https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-3-426
7. Nan Shi, Suquan Zhou, Xunwen Su, Rongfeng Yang, Xianhui Zhu. Unit commitment and multi-objective optimal dispatch model for wind-hydro-thermal power system with pumped storage. In: VIII International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). 22–26 May 2016, Hefei. Hefei: IEEE; 2016, p. 1489–1495. https://doi.org/10.1109/IPEMC.2016.7512512
8. Bortoni EC, Bastos GS, Ferreira TVV. Online optimal power distribution between units in a hydro power plant. In: General Meeting Conference & Exposition. 27–31 July 2014, National Harbor. National Harbor: IEEE; 2014, p. 1–5. https://doi.org/10.1109/PESGM.2014.6939061
9. Kate-singnoy W, Premrudeepreechacharn S. Age estimation of electrographite brush in generator system for optimized maintenance planning of Sirikit hydro power plant. North American Power Symposium (NAPS). 7–9 September 2014, Pullman. Pullman: IEEE; 2014, p. 1–6. https://doi.org/10.1109/NAPS.2014.6965393
10. Sultonov ShM, Sekretarev YuA, Mitrofanov SV. Implementation of the Method of Lagrange for Optimal Modes of Energy System of Tajikistan. Applied Mechanics and Materials. 2014;698:726–731. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.698.726
11. Cerejo da Silva AJ, Pinto Simoes Mariano SL, Alves Calado MR. Optimal Hydro-Wind Power Generation for Day-Ahead Pool Market. IEEE Latin America Transactions. 2015;13(8):2630–2636. https://doi.org/10.1109/TLA.2015.7332142
12. Kler AM, Korneeva ZR, Yelsukov PYu. Optimization of operating conditions of power systems with cogeneration plants and hydro power plants with overyear storage reservoirs. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika* = Thermal Engineering. 2011;2:92–106. (In Russ.)
13. Danilov-Danilyan VI, Khranovich IL. *Water resource management. Coordination of water use strategies*. Moscow: Nauchnyj mir; 2010, 232 p. (In Russ.)
14. Yuan Si, Xiang Li, Dongqin Yin, Ronghua Liu, Jiahua Wei, Yuefei Huang, et al. Evaluating and optimizing the operation of the hydropower system in the Upper Yellow River: A general LINGO-based integrated framework. PLOS ONE. 2018;13(1):e0191483. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191483
15. Trufakin SS, Panteleev VI, Sovban EA, Rusina AG. Long-term HPP mode optimization of the Angara-Yenisei cascade. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* = Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series. 2018;2:144–151.
16. Panteleev VI, Trufakin SS, Pilyugin GA. Stochastic optimization of modes of hydroelectric power plants. In: International conference on industrial engineering, applications and manufacturing. 25–29 March 2019, Sochi. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc; 2019, p. 1–5. https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8743051
17. Trufakin SS, Sovban EA, Rusina AG. Development of the software “Water and energy balances calculations for Angara and Yenisei series of HPS”. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki* = Power engineering: research, equipment, technology. 2016;9–10:105–111. (In Russ.)
18. Sovban EA, Tajnikova MV, Rusina AG. Testing software "Water-energy calculation of hydroelectric power stations of the Angara-Yenisei cascade". *Nauka. Tekhnologii. Innovacii: sbornik nauchnyh trudov* = Science. Technology. Innovation. Collected scientific works. 05–09 December 2016, Novosibirsk. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2016, part. 4, p. 72–74. (In Russ.)
19. Panteleev VI, Trufakin SS. Consideration of electric network limitations when planning long-term regimes of hydroelectric power plants. *Borisovskie chteniya: materialy II Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii pamyati professora V.N. Borisova* = Borisov’s Readings: Proceedings of II All-Russian scientific and technical conference in memory of the Professor V.N. Borisov. 25–27 September 2019, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Technical University; 2019, p. 87–90. (In Russ.)

20. Molin A, Sandberg H, Johansson M. A study on the sensitivity matrix in power system state estimation by using sparse principal component analysis. In: 55th Conference on Decision and Control (CDC). 12–14 December 2016, Las Vegas. Las Vegas: IEEE; 2016, p. 1529–1535. https://doi.org/10.1109/CDC.2016.7798483

Критерии авторства

Пантелеев В.И., Труфакин С.С. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Panteleev V.I., Trufakin S.S. 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

Пантелеев Василий Иванович,
профессор, доктор технических наук,
заведующий кафедрой электротехнических комплексов и систем,
Сибирский федеральный университет,
660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, Россия;
e-mail: pvi0808@rambler.ru

Труфакин Сергей Сергеевич,
аспирант,
Сибирский федеральный университет,
660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, Россия;
✉ e-mail: trufakin.sergey@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vasiliy I. Panteleev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Electrotechnical Complexes and Systems,
Siberian Federal University,
70, Lenin St., Krasnoyarsk 660049, Russia,
e-mail: pvi0808@rambler.ru

Sergey S. Trufakin,
Postgraduate,
Siberian Federal University,
70, Lenin St., Krasnoyarsk 660049, Russia,
✉ e-mail: trufakin.sergey@mail.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.311.001.57, 621.314
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1175-1186

Совместимость динамических характеристик традиционной и электронной генерации в электроэнергетических системах

© М.Ю. Фролов, А.Г. Фишов, Э. Энхсайхан
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

***Резюме*:** Цель – показать на примере простейшей схемы, что неверный выбор законов управления инверторами может негативно сказаться на динамической устойчивости электроэнергетической системы, к которой подключена электронная генерация. В настоящее время малая генерация на основе возобновляемых источников электроэнергии получает все более широкое распространение. В подавляющем большинстве случаев она является несинхронной, однако распределительные электрические сети, объединяющие синхронную и несинхронную генерации, имеют синхронную основу, поэтому малая генерация на основе возобновляемых источников электроэнергии подключается к распределительной сети через инвертор. Данный вид генерации называют электронной. Для обеспечения динамической электромеханической совместимости электронной генерации с внешней электрической сетью предлагается формировать законы управления инверторов на основе эталонной модели, электромеханические параметры которой согласуются с данными внешней сети. Предлагается метод идентификации электромеханических параметров внешней энергосистемы для настройки эталонной модели. Представлены результаты апробации метода на примере реальной электрической сети 0,4 кВ по результатам регистограмм переходных процессов.

Ключевые слова: электронная генерация, параметрическая идентификация, динамическая электромеханическая совместимость, малая генерация, эталонная модель, инвертор

Информация о статье: Дата поступления 01 июля 2019 г.; дата принятия к печати 24 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2019 г.

Для цитирования: Фролов М.Ю., Фишов А.Г., Энхсайхан Э. Совместимость динамических характеристик традиционной и электронной генерации в электроэнергетических системах. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2019. Т. 23. № 6. С. 1175–1186. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1175-1186

Compatibility of traditional and electronic generation dynamic characteristics in electric power systems

Mikhail Yu. Frolov, **Alexander G. Fishov**, **Erdenebat Enkhsaikhan**
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

***Abstract*:** The purpose of the paper is using the simplest scheme to show the negative effect of the wrong choice of inverter control laws on the dynamic stability of the electric power system with connected electronic generation. Today the small-scale generation based on renewable energy sources is becoming more and more widespread. In the majority of cases, it is non-synchronous. As distribution electrical networks combining synchronous and non-synchronous generation have a synchronous basis the small-scale generation using renewable energy sources is connected to the distribution network through an inverter. This type of generation is called electronic. To ensure the dynamic electro-mechanical compatibility of electronic generation and the external electrical system it is proposed to form the invertor control laws on the basis of a reference model, the electromechanical parameters of which are consistent with the data of the external network. The identification method of electromechanical parameters of the external power system is proposed for reference model adjustment. The results of method approbation on the example of a real 0.4 kV electric network based on the transient histogram results are presented.

Keywords: electronic generation, parametric identification, dynamic electromechanical compatibility, small-scale generation, reference model, inverter

Information about the article: Received July 01, 2019; accepted for publication November 24, 2019; available online December 28, 2019.

For citation: Frolov MYu, Fishov AG, Enkhsaikhan E. Compatibility of traditional and electronic generation dynamic characteristics in electric power systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1175–1186. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1175-1186

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее распространение получают генерирующие установки малой мощности до 25 МВт (малая генерация), которые располагаются в шаговой доступности к потребителю и присоединяются к распределительной электрической сети. Множество таких установок в общей электрической сети получило название «распределенная малая генерация» [1, 2]. В Европе и США малая генерация представлена преимущественно возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) [3]. В России большей популярностью пользуется синхронная малая генерация на углеводородном топливе [4, 5], однако высокий темп развития технологий, связанных с ВИЭ, делает экономически обоснованным более активное внедрение данных видов источников энергии на территории России, особенно в качестве малой генерации [6]. При автономной работе ВИЭ обычно дополняются системами накопления энергии, т.к. ее генерация имеет стохастический характер, зависящий от погодных условий. В сети переменного тока источники на основе ВИЭ и накопители энергии, как правило, включаются через инверторы и являются, в отличие от традиционных синхронных генераторов, так называемыми электронными генераторами.

Поведение электронных генераторов при электромеханических переходных процессах в электрических сетях и энергосистемах радикально отличается от поведения синхронных генераторов, обладающих значительной электромеханической инерцией, что усложняет работу автоматики и способно снижать динамическую устойчивость системы. Однако систему управления инверторами можно настроить таким образом, чтобы электронная генерация представляла собой режимный аналог обычной синхронной электромеханической генерации [7], что удобно для проектирования и эксплуатации электроэнергетических систем, т.к. это нивелирует специфические особенности влияния такой генерации на устойчивость, токи короткого замыкания, работу релейной защиты и автоматики.

Существенный плюс заключается в возможности не учитывать специфические проявления электронной генерации для анализа режимов и настройки средств релейной защиты и автоматики. Реализация подхода, связанного с приданием электронной генерации желаемых динамических характеристик, предполагает организацию внешнего контура управления инвертором, в котором задается «эталонное» поведение электронной генерации (ЭГ) в динамических режимах. Системы управления, работающие по такому принципу, называются системами управления с эталонной моделью.

Для разработки системы управления объектами электронной генерации с эталонной моделью необходимо выполнить построение данной конструкции, соответствующей внешней энергосистеме (по своим электродинамическим характеристикам), к которой она подключается, следовательно, необходимо определить параметры динамических характеристик внешней энергосистемы, после чего присвоить аналогичные данные эталонной модели. Таким методом будет достигнута динамическая электромеханическая совместимость электронной генерации с внешней энергосистемой, где под динамической электромеханической совместимостью понимается способность частей энергосистемы проявлять идентичность своего поведения при низкочастотном (электромеханическом) переходном процессе.

В статье обосновывается необходимость обеспечения динамической совместимости электронной генерации с внешней электрической сетью и предлагается метод идентификации параметров внешней электроэнергетической системы для настройки эталонной модели.

2. ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Исследование влияния параметров эталонной модели электронной генерации было выполнено для простейшей электроэнергетической системы (ЭЭС) с электронной и синхронной генерациями (параллельно работающими) при выдаче мощности во внешнюю электрическую сеть с шинами бесконечной мощности. Схема модели в Matlab Simulink представлена на рис. 1, где электронная генерация моделируется эталонным синхронным генератором. На схеме приняты следующие обозначения: Synchronous machine – синхронная машина; Reference synchronous machine – эталонная синхронная машина; Transformer 1, 2 – трансформаторы 1 и 2; Line 1, 2, 3 – линии электропередачи 1, 2, 3; Load 1, 2 – нагрузки 1, 2; Bus source – шины бесконечной мощности; Three-Phase Fault – блок трехфазного замыкания; Measurements – измерительный блок.

В качестве возмущающего воздействия имитировалось трехфазное короткое замыкание длительностью 0,1 с.

В первом эксперименте динамические данные и загрузка (в процентном соотношении от номинальной) синхронной и эталонной машин были равны; во втором являлись общими параметры, загрузка отличалась на 20%; в третьем – одинаковая загрузка, различались вдвое постоянные времени инерции T_j; в четвертом – загрузка равная, разнились индуктивные сопротивления; в пятом – загрузка одинаковая, имели различия сопротивления и T_j.

На рис. 2 изображены осциллограммы угла ротора, токов синхронной и эталонной машин в соответствующих для каждой относительных номинальных единицах.

Из полученных графиков можно сделать следующие выводы:

– при равенстве загрузки и параметров синхронной машины и эталонной модели наблюдается полная динамическая совместимость, т.к. графики токов и углов абсолютно идентичны;

– различие в величине загрузки имеющихся источников генерации не сказывается существенным образом на совместимости, т.к. имеется различие частоты колебаний токов и углов машин;

– значительное различие в величине сопротивления или постоянной инерции синхронной и эталонной машин приводит к нарушению совместимости, т.к. имеется значительное различие частоты колебаний токов и углов машин;

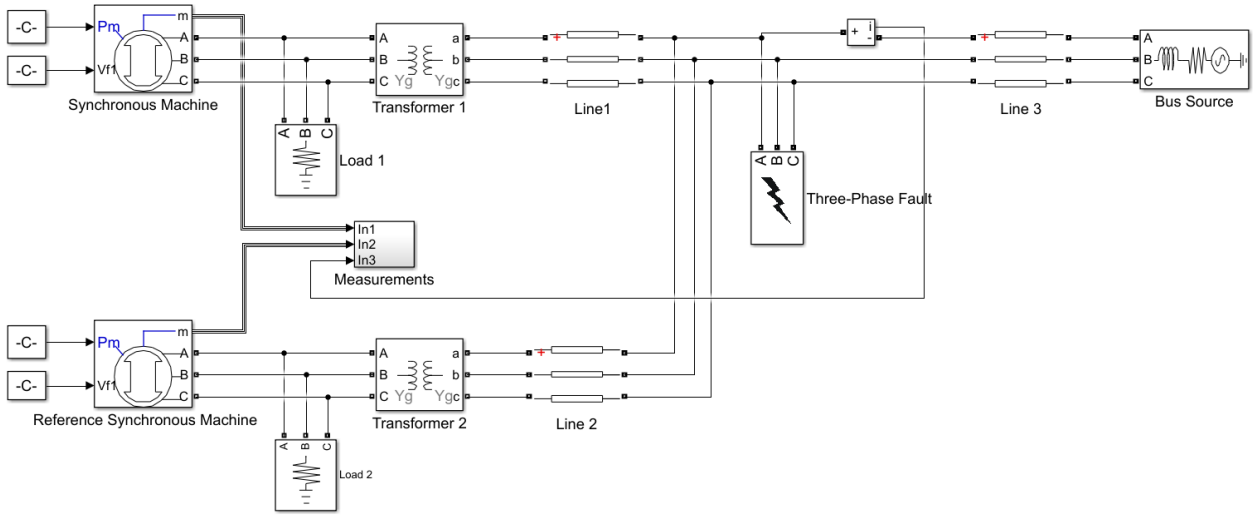
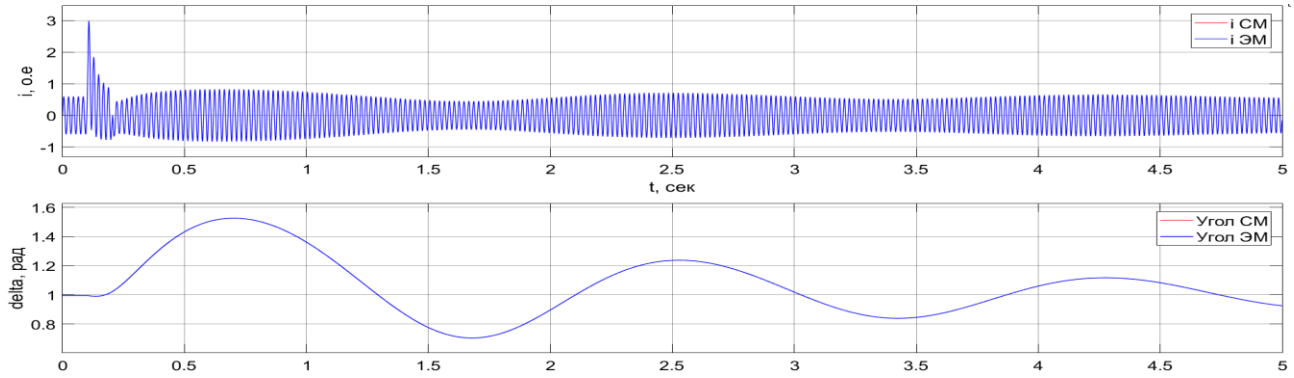
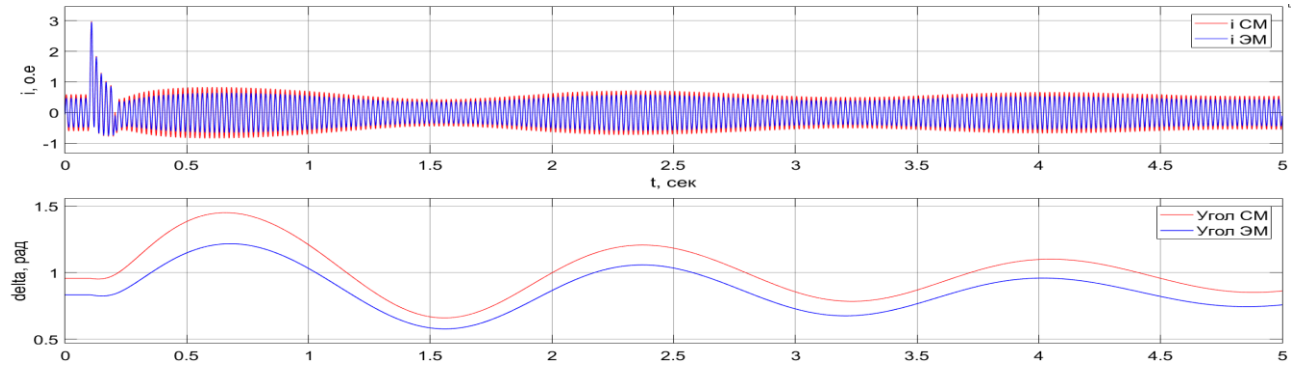


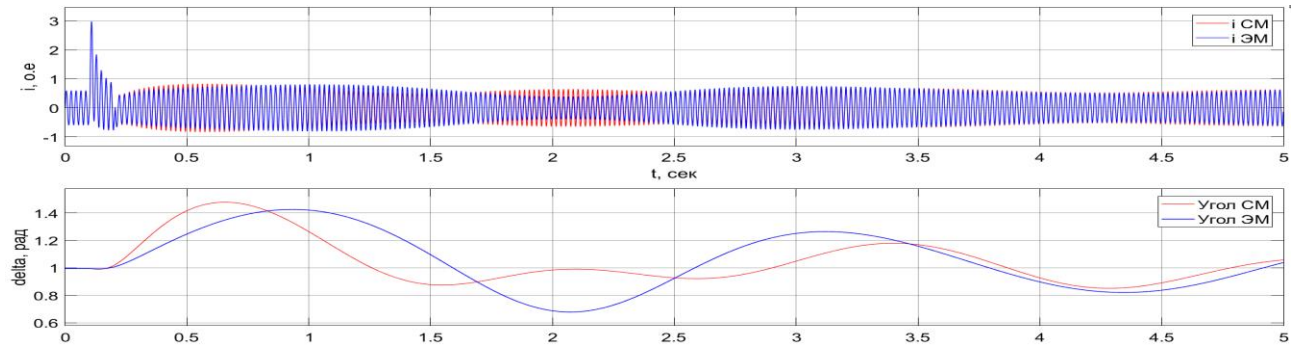
Рис. 1. Схема для исследования влияния параметров генерации на переходный процесс
Fig. 1. Diagram for studying generation parameters influence on the transition process


i СМ
i ЭМ
i, о.е
t, сек
Угол СМ
Угол ЭМ
delta, рад

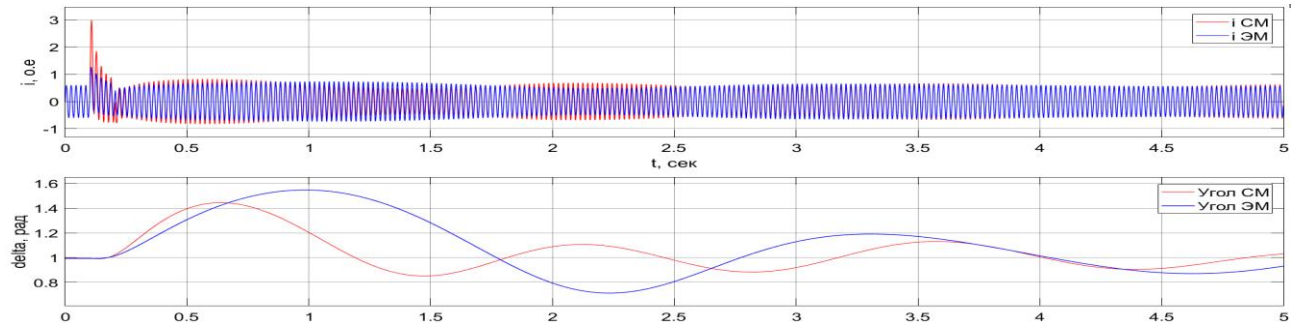
a


i СМ
i ЭМ
i, о.е
t, сек
Угол СМ
Угол ЭМ
delta, рад

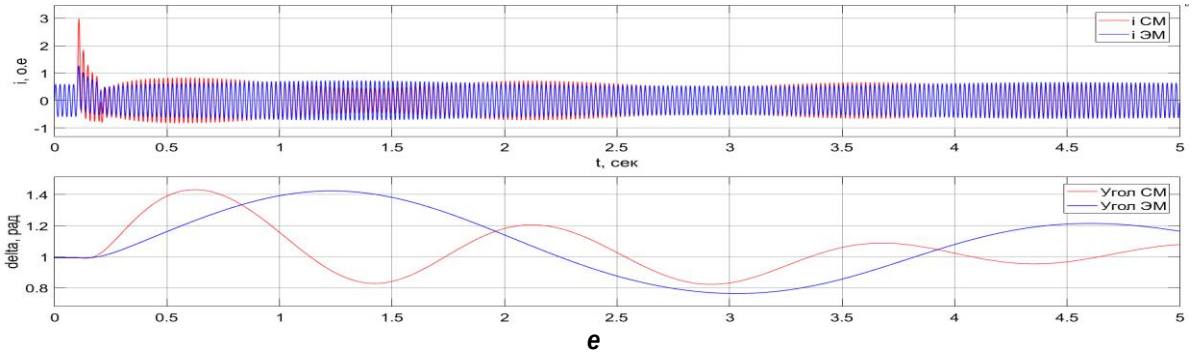
b


i СМ
i ЭМ
i, о.е
t, сек
Угол СМ
Угол ЭМ
delta, рад

c


i СМ
i ЭМ
i, о.е
t, сек
Угол СМ
Угол ЭМ
delta, рад

d



e

Рис. 2. Осциллограммы токов статора и углов ротора синхронной и эталонной синхронной машин: a – при равенстве загрузки и параметров; b – при разнице в загрузке 20%; c – при равенстве загрузки и различии сопротивлений; d – при равенстве загрузки и различии в T_j; e – при равенстве загрузки и различии сопротивлений и T_j

Fig. 2. Oscillograms of stator currents and rotor angles of synchronous and reference synchronous machines: a – when loading and parameters are equal; b – when loading difference is 20%; c – when loading is equal and there is difference in resistances; d – when loading is equal and there is difference in Tj; e – when loading is equal there is difference in resistances and T_j

– различие в сопротивлениях и постоянных инерции одновременно может привести к наибольшему нарушению динамической электромеханической совместимости.

Стоит отметить, что одновременное различие в сопротивлении и постоянной времени может не приводить к нарушению динамической совместимости, например, если у эталонной модели разница в постоянной времени будет в большую сторону, а сопротивление – в меньшую, и наоборот.

Учитывая, что недостаточная динамическая совместимость источников усложняет выдачу адекватных управляющих воздействий автоматикой и снижает динамическую устойчивость ЭЭС, необходимо, чтобы в системе управления объектами электронной генерации была подсистема, определяющая параметры эквивалентного внешнего генератора и настраивающая в соответствии с ними параметры эталонной модели. Для достижения этой цели предлагается метод параметрической идентификации динамических параметров внешней электрической сети.

3. МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

При подключении электронной генерации к электрической сети единственными данными, которыми можно воспользоваться для идентификации, являются осциллограммы напряжений и частоты, поэтому внешняя энергосистема замещается эквивалентным генератором (С), обладающим сопротивлением и постоянной механической инерции, к шинам которого присоединяется ЭГ через выключатель (В) и преобразователь (П) (рис. 3). Так как отсутствует возможность создавать возмущения во внешней сети, будет проводиться пассивная идентификация [8] с использованием эксплуатационных возмущений по осциллограммам режимных параметров в нормальных и аварийных режимах электрической сети.

Существует большое количество методов параметрической идентификации, однако по ряду причин они не могут быть применены в рассматриваемой задаче [9–20]. Предлагаемый метод идентификации эквивалентных динамических параметров электрической сети основывается на обработке осциллограмм частоты напряжения сети в точке присоединения электрической генерации к системе. Запись осциллограмм производится в режиме, предшествующем параллельной работе электронной генерации с системой, т.е. при отключенном выключателе (см. рис. 3).

Основным источником колебаний частоты сети является хаотично изменяю-

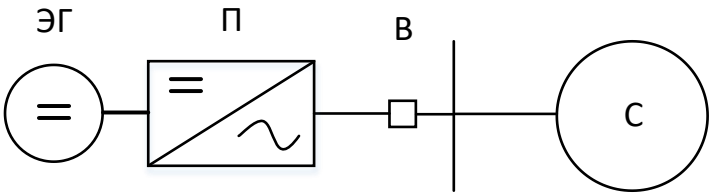


Рис. 3. Принципиальная схема подключения электронной генерации к электрической сети
Fig. 3. Schematic diagram of electronic generation connection to the electrical network

щаяся величина нагрузки. Имеющийся при этом небаланс генерируемой и потребляемой мощности компенсируется изменением скорости вращения роторов синхронных и асинхронных машин, частоты сети. При этом возникает электромеханический переходный процесс, при котором период колебаний угла эквивалентного ротора в основном зависит от массы роторов синхронных машин, находящихся в системе. Имеющиеся автоматические регуляторы скорости и частоты также воздействуют на скорость вращения генераторов, удерживая значения частоты сети в допустимых пределах, вызывая при этом нерегулярные колебания, частота которых зависит от настройки регуляторов. Период нерегулярных колебаний в среднем на порядок больше периода электромеханических колебаний.

Основной динамический параметр, которым характеризуется внешняя энергосистема, – постоянная времени инерции эквивалентного синхронного генератора, поэтому из осциллограммы выделяется составляющая, соответствующая электромеханическим колебаниям.

Движение ротора эквивалентного синхронного генератора описывается уравнением:

$$T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} + K_d \frac{d\delta}{dt} = P_T - P_{эм} \qquad (1)$$

при

$$P_{эм} = P_{\max} \sin\delta = \frac{E_q U_c}{x_{d\Sigma}} \sin\delta,$$

где T_j – механическая постоянная инерции; E_q – электродвижущая сила (ЭДС) по поперечной оси; U_c – напряжение сети; δ – угол ротора генератора между E_q и U_c; K_d – коэффициент демпфирования; P_T – мощность турбины; $P_{эм}$ – электромагнитная мощность генератора; P_{max} – максимальная электромагнитная мощность генератора; $x_{d\Sigma}$ – суммарное продольное сопротивление; t – время.

Для того чтобы воспользоваться уравнением (1), необходимо из осциллограммы частоты получить зависимость изменения угла ротора от времени. Для этого необходимо вычесть постоянную составляющую из осциллограммы, умножить на *2П*, таким образом, получим изменение угловой частоты и проинтегрируем получившийся сигнал (рис. 4). В итоге будем иметь зависимость изменения угла от времени $\delta = f(t)$.

Линеаризуем уравнение (1). Для этого угол δ необходимо представить в виде двух слагаемых: $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$, где δ_0 – исходное значение угла и $\Delta\delta$ – приращение угла. Тогда $d^2\delta/dt^2 = d^2(\delta_0 + \Delta\delta)/dt^2 = d^2\Delta\delta/dt^2$, т.к. производная от константы равна нулю. После аналогичных рассуждений – $d\delta/dt = d\Delta\delta/dt$. Электромагнитная мощность генератора раскладывается в ряд Тейлора по приращению угла $\Delta\delta$ в окрестности δ_0.

$$P_{\max} \sin\delta = P_{\max} \sin\delta\big|_{\delta=\delta_0} + \left(\frac{1}{1!}\frac{dP}{dt}\right)\Bigg|_{\delta=\delta_0} \Delta\delta + \ldots,$$

где $P_{\max} \sin\delta\big|_{\delta=\delta_0}$ – электромагнитная мощность, определенная при угле δ_0, которая совпадает с мощностью турбины P_T;

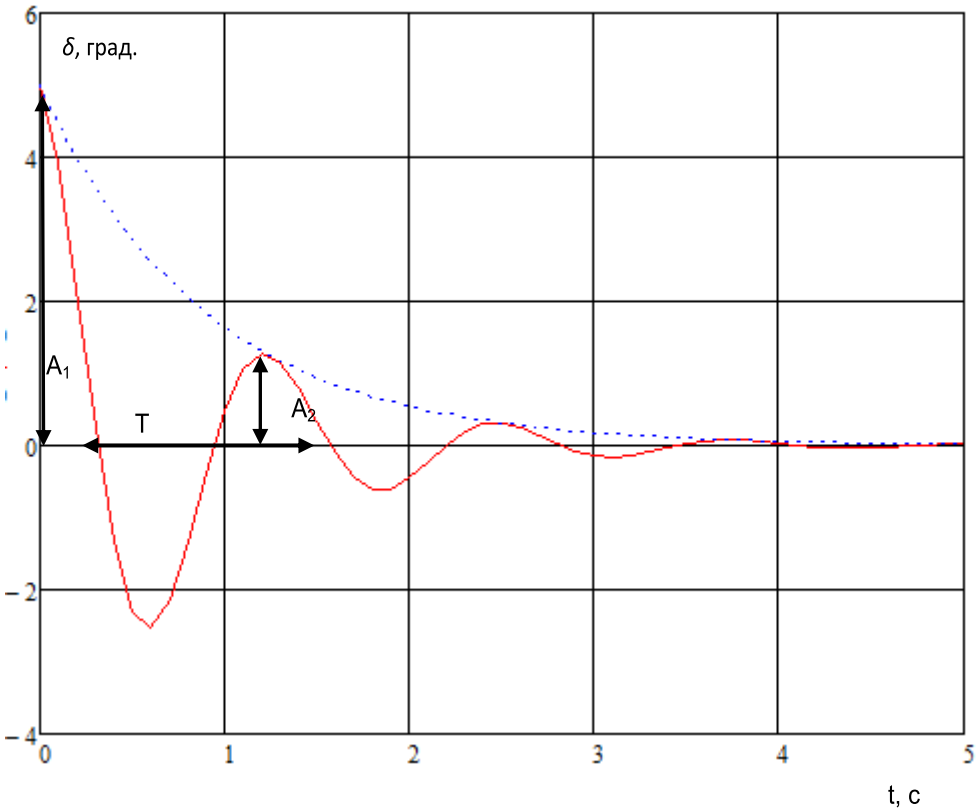


Рис. 4. Изменение угла ротора во времени
Fig. 4. Rotor angle variation in time

$\left(\frac{1}{1!}\frac{dP}{dt}\right)\Big|_{\delta=\delta_0}\Delta\delta$ – производная от электромагнитной мощности, вычисленная при угле δ_0, – синхронизирующая мощность; составляющими более высокого порядка пренебрегаем. Составляющая

$$\left(\frac{1}{1!}\frac{dP}{dt}\right)\Big|_{\delta=\delta_0} = P_{\max}\cos\delta = \frac{E_{q0}U_c}{x_{d\Sigma}}\cos\delta = C_1$$

представляет собой постоянный коэффициент, поэтому правая часть уравнения (6) принимает вид $P_T - P_{\max}\sin\delta\big|_{\delta=\delta_0} - C_1\Delta\delta$ (первые два слагаемых данного выражения равны и взаимно уничтожаются). После введения оператора дифференцирования $d/dt = p$ уравнение примет следующий вид:

$$T_j p^2\Delta\delta + K_d p\Delta\delta + C_1\Delta\delta = 0.$$

Решение этого уравнения:

$$\Delta\delta = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}.$$

Характеристическое уравнение:

$$T_j p^2 + K_d p + C_1 = 0.$$

Корни характеристического уравнения:

$$p_{1,2} = \frac{-K_d \pm \sqrt{K_d^2 - 4T_j C_1}}{2T_j} = \alpha \pm j\gamma$$

при

$$\alpha = \frac{K_d}{2T_j}; \qquad (2)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{C_1}{T_j} - \alpha^2}, \qquad (3)$$

где C_1 – синхронизирующая мощность; α – декремент затухания; γ – собственная частота колебаний ротора синхронной машины.

Определить α и γ можно из осцилло-

граммы (см. рис. 4), пользуясь следующими выражениями:

$$T = \frac{1}{\gamma}; \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{T}\ln(\frac{A_1}{A_2}). \quad (5)$$

Выразив T_j из (3) получим выражение для расчета постоянной времени инерции:

$$T_j = \frac{C_1}{\gamma^2 + \alpha^2}. \quad (6)$$

Сопротивление эквивалентного генератора можно найти по этому выражению:

$$x_{d\Sigma} = \frac{E_q U_c}{P_{\max}}. \quad (7)$$

4. ПРИМЕР ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ В ТОЧКЕ СЕТИ 0,4 кВ ПО РЕГИСТОГРАММАМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Для подтверждения работоспособности предложенного метода идентификации эквивалентных динамических параметров внешней электрической сети был проведен физический эксперимент, который заключался в следующем: проводилось осциллографирование частоты и напряжения в точке предполагаемого присоединения электронной генерации к электрической сети. На рис. 5 представлена одна из характерных осциллограмм на интервале десяти мин. Из осциллограммы можно выделить несколько составляющих. Присутствует длительно-затухающая составляющая с периодом около 2,5 мин. Очевидно, что составляющая с таким большим периодом не может быть обусловлена электромеханическими переходными процессами, т.к. они должны быть соизмеримы с постоянной механической инерции машин. Данная составляющая представляет собой нерегулярные колебания, вызванные действием регуляторов.

Также присутствует вторая колебательная составляющая с меньшим периодом, которая, судя по величине периода, обусловлена электромеханическими переходными процессами, вызванными колебаниями роторов машин вследствие постоянного изменения нагрузки. На десятиминутном промежутке вместилось 80 периодов, что соответствует среднему значению периода 7,5 с. Чтобы убедиться, что данная величина не меняется в широком диапазоне, рассмотрим три секундных интервала и определим величину периодов второй составляющей, вместившихся на каждом из интервалов.

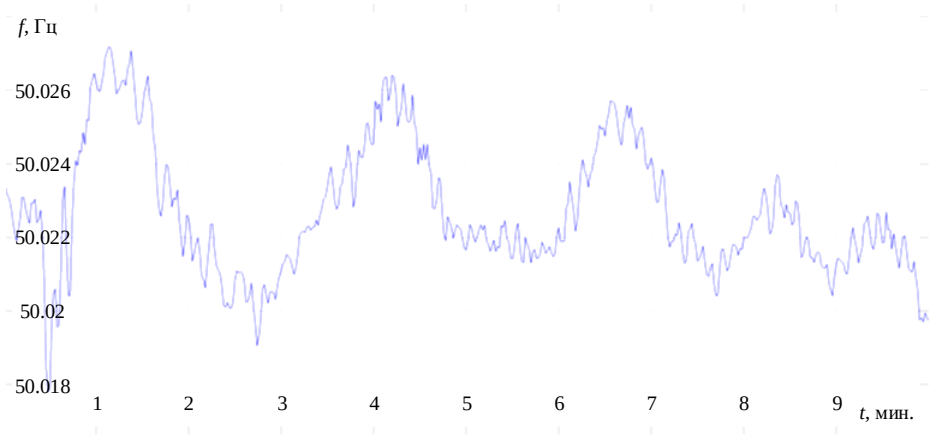


Рис. 5. Осциллограмма частоты
Fig. 5. Frequency waveform

Как видно из табл. 1, величина периодов изменяется в небольшом диапазоне, это обусловлено в основном тем, что из-за хаотичности коммутаций в системе переходные процессы накладываются друг на друга.

Таблица 1

Периоды электромеханической составляющей процесса за три временных интервала (минуты)

Table 1

Periods of the electromechanical component of the process in three time intervals (minutes)

Первый интервал 1–2	Второй интервал 5–6	Третий интервал 7–8
0,163	0,131	0,133
0,191	0,104	0,184
0,175	0,096	0,098
0,18	0,157	0,117
0,124	0,126	0,102
0,112	0,091	0,111
–	0,101	0,119

Для определения декремента затухания необходимо перейти от осциллограммы частоты к осциллограмме угла и определить на ней участки, где процессы не накладываются друг на друга. На осциллограмме имеется несколько таких участков, на рис. 6 представлен один из них.

Определив значения амплитуд и периода колебания из графика (см. рис. 4) и воспользовавшись выражениями (4), (5), получим: α = -0,295 $с^{-1}$; T = 6,6 с; γ = 0,152 $с^{1}$.

Для того чтобы произвести оценочный расчет, примем, что эквивалентный генератор загружен на номинальную мощность, и данная загрузка соответствует значению коэффициента запаса статической устойчивости 20%. Коэффициент запаса $K_з$ статической устойчивости рассчитывается по следующему выражению:

$$K_з = \frac{P_{\max} - P_T}{P_T} \cdot 100\%. \qquad (8)$$

В относительных единицах (о.е.) номинальная мощность загрузки эквивалентного генератора будет равна единице (P_T = 1), тогда из (8) следует, что $P_{\max}$ = 1,2. Если $P_{эм} = P_{\max}\sin\delta$, тогда

$$\delta = \arcsin\left(\frac{P_{эм}}{P_{\max}}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{1,2}\right) = 56,44°;$$

$$C_1 = P_{\max}\cos\delta = 1,2\cos(56,44) = 0,663 \text{ о.е.}$$

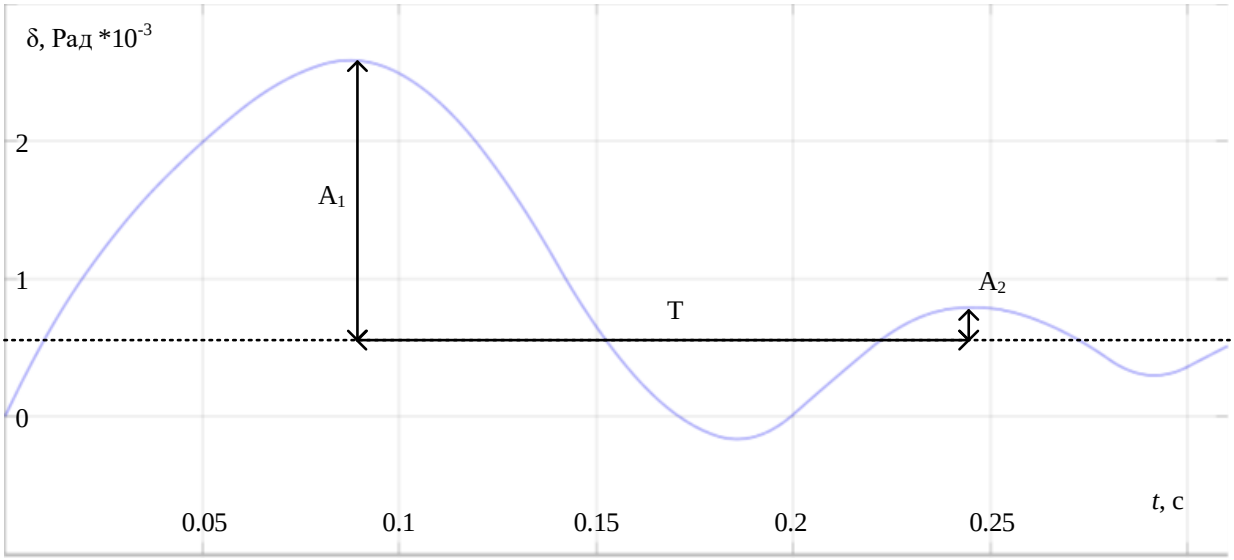


Рис. 6. Зависимость отклонения угла ротора от времени
Fig. 6. Rotor angle deviation vs time

Произведя расчет по выражению (6), получим

$$T_j = \frac{0,663}{0,152^2 + 0,295^2} = 6,02 \text{ с.}$$

Таблица 2

Результаты идентификации эквивалентных параметров внешней энергосистемы

Table 2

Identification results of external power system equivalent parameters

Параметр	Значение
E_q	272,15 В
$x_{d\Sigma}$	1,042 о.е.
T_j	6,02 с
δ	56,44°

Измеренное значение напряжения в точке присоединения электронной генерации U_c = 217,72 В, примем это значение за базисное напряжение $U_б$ = 217,72 В. Для расчета примем, что ЭДС эквивалентного генератора на 25% (табл. 2) больше напряжений в принимающем узле, поэтому E_q = 1,25 о.е. = 272,15 В, тогда, пользуясь выражением (7), получим

$$x_{d\Sigma} = \frac{E_q U_c}{P_{\max}} = \frac{1,25 \cdot 1}{1,2} = 1,042 \text{ о.е.}$$

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснована необходимость обеспечения динамической электромеханической совместимости при подключении электронной генерации на параллельную работу с внешней электрической сетью, предложен метод ее параметрической идентификации, апробированный в ходе физического эксперимента по регистограммам переходного процесса в электрической сети напряжением 0,4 кВ.

Библиографический список

1. Воропай Н.И. Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы // Автоматизация и IT в энергетике. 2011. № 3. С. 11–16.
2. Воропай Н.И. Распределенная генерация в электроэнергетических системах // Малая энергетика: труды Междунар. науч.-практ. конф. 2005. С. 9–11. [Электронный ресурс]. URL: http://www.combienergy.ru/stat/983-Raspredelennaya-generaciya-v-elektroenergeticheskih-sistemah (25.10.18).
3. Кобец Б.Б., Волкова И.О., Окороков В.Р. Smart Grid как концепция инновационного развития электроэнергетики за рубежом // Энергоэксперт. 2010. № 2. С. 52–58.
4. Фишов А.Г. Интеллектуальная электрическая сеть – революция в отношениях субъектов и управлении режимами электроэнергетических систем // Электроэнергетика глазами молодежи: сб. докл. III междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. (г. Екатеринбург, 22–26 октября 2012 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2012. Т. 1. С. 91–97.
5. Фишов А.Г., Калюжный Р.С. Сценарии развития региональной энергосистемы в современных условиях // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2012. № 3. С. 161–172.
6. Баринов В.А. Перспективы развития электроэнергетики России на период до 2030 г. // Кабели и провода. 2010. № 3. С. 13–20.
7. Po-Hsu Huang, Vorobev P., Hosani M.A., Kirtley J.L., Turitsyn K. Systematic design of virtual component method for inverter-based microgrids // IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2017. [Электронный ресурс]. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8274579 (25.02.2018). https://doi.org/10.1109/PESGM.2017.8274579
8. Райбман Н.С. Что такое идентификация? М.: Наука, 1970. 118 с.
9. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Изд. 4-е, сокр. и перераб. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. 408 с.
10. Кибартас В.В., Кибартене Ю.В. Метод идентификации параметров обмоток синхронных электродвигателей различных конструктивных особенностей // Вестник Павлодарского университета. 2004. № 1. С. 163–168.
11. Soliman M., Westwick D., Malik O.P. Identification of Heffron-Philips model parameters for synchronous generators operating in closed loop // IET Generation, Transmission & Distribution. 2008. Vol. 2. No. 4. P. 530–541. https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20070405
12. Hasni M., Touhani O., Ibtiouen R., Fadel M., Caux S. Modelling and Parameter identification of synchronous machine by PWM excitation signals // IEEE International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (Pisa, 14–16 June 2010). Pisa, 2010. P. 442–447. https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2010.5545040
13. Karrari M., Malik O.P. Identification of Physical Parameters of a Synchronous Generator From Online

Measurement // IEEE Transactions on energy conversion. 2004. Vol. 19. No. 2. P. 407–415.
14. Wamkeue R., Jolette C., Mabwe A.B.M., Kamwa I. Cross-Identification of Synchronous Generator Parameters From RTDR Test Time-Domain Analytical Responses Ren´e Wamkeue, Senior Member // IEEE Transactions on energy conversion. 2011. Vol. 26. No. 3. P. 776–786. https://doi.org/10.1109/TEC.2011.2140320
15. Zhengming Zhao, Fungshi Zheng, Jide Gao, Longya Xu. A Dynamic On-Line Parameter Identification and Full-scale System Experimental Verification for Large Synchronous Machines // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1995. Vol. 10. Issue 3. P. 392–397. https://doi.org/10.1109/60.464859
16. Verbeec J., Pintelon R., Lataire P. Identification of Synchronous Machine Parameters Using a Multiple Input Multiple Output Approach // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1999. Vol. 14. Issue 4. P. 909–917. https://doi.org/10.1109/60.815007
17. Zivanovic R. Parameter estimation by solving multivariate polynomial system: a synchronous machine example // Control & Automation (MED). XX Mediterranean Conference. 2012. P. 604–609. https://doi.org/10.1109/MED.2012.6265704
18. Karayaka H. B., Keyhani A., Heydt G. T., Agrawal B. L., Selin D. A. Synchronous Generator Model Identification and Parameter Estimation From Opening Data // IEEE transactions on energy conversion. 2003. Vol. 18. Issue 1. P. 121–126. https://doi.org/10.1109/TEC.2002.808347
19. Rahman K.M., Silva H. Identification of Machine Parameters of a Synchronous Motor // IEEE transitions on industry applications. 2005. Vol. 41. No. 2. P. 557–565. https://doi.org/10.1109/TIA.2005.844379
20. Lixia Sun, Ping Qu, Qixin Huang, Ping Ju. Parameter Identification of Synchronous Generator by Using Ant Colony Optimization Algorithm // Published in: 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (Harbin, 23–25 May 2007). Harbin: IEEE, 2007. P. 2834–2838. https://doi.org/10.1109/ICIEA.2007.4318929

References

1. Voropaj, N.I. Intelligent electric power systems: concept, state, prospects. Avtomatizaciya i IT v energetike= Automation and IT in the energy sector. 2011;3:11–16. (In Russ.)
2. Voropaj NI. Distributed generation in power systems. In: *Malaya energetika: trudy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* = Small-scale power generation: Proceedings of the International scientific and practical conference. 2005, p. 9–11. Available from: http://www.combienergy.ru/stat/983-Raspredelennaya-generaciya-v-elektroenergeticheskih-sistemah [Accessed 25th October 2018]. (In Russ.)
3. Kobec BB, Volkova IO, Okorokov VR. Smart Grid as a concept of electric power industry innovative development abroad. *Energoekspert* = Energy Expert. 2010;2:52–58. (In Russ.)
4. Fishov AG. Intelligent electric network is a revolution in subjects - power system mode controlrelations. *Elektroenergetika glazami molodezhi: sbornik dokladov III mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* = Electric power through the eyes of youth: Collected reports of III international scientific and practical conference 22–26 October 2012, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Federal University; 2012, vol. 1, pp. 91–97. (In Russ.)
5. Fishov AG, Kalyuzhnyj RS. Scenarios for the development of regional power in modern conditions. *Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Scientific Bulletin of NSTU. 2012;3:161–172. (In Russ.)
6. Barinov VA. Development prospects of power engineering in Russia until 2030*. Kabeli i provoda* = Cables and Wires. 2010;3:13–20. (In Russ.)
7. Po-Hsu Huang, Vorobev P, Hosani MA, Kirtley JL, Turitsyn K. Systematic design of virtual component method for inverter-based microgrids. IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2017. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/document/8274579 [Accessed 25th February 2018]. https://doi.org/10.1109/PESGM.2017.8274579
8. Raybman NS. *What is identification?* Moscow: Science; 1970. 118 p. (In Russ.)
9. Zherve GK. *Industrial tests of electric machines*. Leningrad: Energoatomedit. Leningrad department; 1984. 408 p. (In Russ.)
10. Kibartas BB, Kibartene YuV. Method of parameter identification of synchronous motor windings of various design features. *Vestnik Pavlodarskogo universiteta* = Bulletin of Pavlodar state University. 2004;1:163–168. (In Russ.)
11. Soliman M, Westwick D, Malik OP. Identification of Heffron-Philips model parameters for synchronous generators operating in closed loop. IET Generation, Transmission & Distribution. 2008;2(4):530–541. https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20070405
12. Hasni M, Touhani O, Ibtiouen R, Fadel M, Caux S. Modelling and Parameter identification of synchronous machine by PWM excitation signals. IEEE International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. 14–16 June 2010, Pisa. Pisa; 2010, p. 442–447. https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2010.5545040
13. Karrari M, Malik OP. Identification of Physical Parameters of a Synchronous Generator From Online Measurements. IEEE Transactions on energy conversion. 2004;19(2):407–415.
14. Wamkeue R, Jolette C, Mabwe ABM, Kamwa I. Cross-Identification of Synchronous Generator Parameters From RTDR Test Time-Domain Analytical Responses Ren´e Wamkeue, Senior Member. IEEE Transactions on energy conversion. 2011;26(3):776–786. https://doi.org/10.1109/TEC.2011.2140320

15. Zhengming Zhao, Fungshi Zheng, Jide Gao, Longya Xu. A Dynamic On-Line Parameter Identification and Full-scale System Experimental Verification for Large Synchronous Machines. IEEE Transactions on Energy Conversion. 1995;10(3):392–397. https://doi.org/10.1109/60.464859
16. Verbeec J, Pintelon R, Lataire P. Identification of Synchronous Machine Parameters Using a Multiple Input Multiple Output Approach. IEEE Transactions on Energy Conversion. 1999;14(4):909–917. https://doi.org/10.1109/60.815007
17. Zivanovic R. Parameter estimation by solving multivariate polynomial system: a synchronous machine example. Control & Automation (MED). XX Mediterranean Conference. 2012, p. 604–609. https://doi.org/10.1109/MED.2012.6265704
18. Karayaka HB, Keyhani A, Heydt GT, Agrawal BL, Selin DA. Synchronous Generator Model Identification and Parameter Estimation From Opening Data. IEEE transactions on energy conversion. 2003;18(1):121–126. https://doi.org/10.1109/TEC.2002.808347
19. Rahman KM, Silva H. Identification of Machine Parameters of a Synchronous Motor. IEEE transitions on industry applications. 2005;41(2):557–565. https://doi.org/10.1109/TIA.2005.844379
20. Lixia Sun, Ping Qu, Qixin Huang, Ping Ju. Parameter Identification of Synchronous Generator by Using Ant Colony Optimization Algorithm. Published in: 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 23–25 May 2007, Harbin. Harbin: IEEE; 2007. P. 2834–2838. https://doi.org/10.1109/ ICIEA.2007.4318929

Критерии авторства

Фролов М.Ю., Фишов А.Г. Энхсайхан Э. 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

Frolov M.Yu., Fishov A.G., Enkhsaikhan E. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of intrests

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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фролов Михаил Юрьевич,
кандидат технических наук,
ассистент,
Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск,
просп. Карла Маркса, 20, Россия;
✉ e-mail: myu.frolov@gmail.com

Фишов Александр Георгиевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры автоматизированных электроэнергетических систем,
Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск,
просп. Карла Маркса, 20, Россия;
e-mail: fishov@ngs.ru

Эрдэнэбат Энхсайхан,
аспирант,
Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск,
просп. Карла Маркса, 20, Россия;
e-mail: enkhsaikhan@must.edu.mn

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail Yu. Frolov,
Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Lecturer,
Novosibirsk state university,
20, K.Marx pr., Novosibirsk 630090, Russia;
✉ e-mail: myu.frolov@gmail.com

Alexander G. Fishov,
Dr. Sci. (Eng.),
Professor of the Department
of Automated Electric Power Systems,
Novosibirsk state university,
20, K.Marx pr., Novosibirsk 630090, Russia;
e-mail: fishov@ngs.ru

Erdenebat Enkhsaikhan,
Postgraduate Student,
Novosibirsk state university,
20, K.Marx pr., Novosibirsk 630090, Russia;
e-mail: enkhsaikhan@must.edu.mn

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.383.51
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1187-1202

Назначение шунтирующих диодов солнечной панели и методы их диагностики

© С.В. Швец, А.В. Байшев
Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, г. Абакан, Россия

Резюме: Цель – обозначить важность проведения мероприятий по диагностике и поддержанию в исправном состоянии шунтирующих диодов в составе солнечной панели. Исследование проведено с использованием теоретического анализа информационных данных о шунтирующих диодах и их диагностике. Рассмотрены дефекты солнечной панели, возникающие по причине неисправных шунтирующих диодов. Использовано компьютерное моделирование в программе PVSYST, проведена имитация неисправностей шунтирующих диодов на солнечной панели YL-250P-29b и их диагностика методами анализа тока короткого замыкания при частичном затенении и параметра напряжения холостого хода в нормальных условиях. Установлено, что методы тепловизионной диагностики (в том числе с использованием беспилотника) и визуальная инспекция не являются точными инструментами поиска неисправных шунтирующих диодов. Для малых солнечных электростанций (а также для диагностики шунтирующих диодов солнечных панелей из запасных частей, инструментов, приспособлений на крупных солнечных электростанциях) применимы методы анализа тока короткого замыкания при частичном затенении и параметра напряжения холостого хода в нормальных условиях. Для полной диагностики неисправностей шунтирующих диодов на крупных солнечных электростанциях рекомендован метод тепловизионной диагностики с применением внешнего источника.

Ключевые слова: солнечная электростанция, шунтирующие диоды, диагностика шунтирующих диодов, тепловизионная диагностика, электролюминисценция, визуальная инспекция

Информация о статье: Дата поступления 09 октября 2019 г.; дата принятия к печати 12 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2019 г.

Для цитирования: Швец С.В., Байшев А.В. Назначение шунтирующих диодов солнечной панели и методы их диагностики. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 6. С. 1187–1202. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1187-1202

Bypass diode function in solar panels and their diagnostic methods

© Sergey V. Shvets, Anatoliy V. Baishev
Khakass State University named after N.F. Katanov, Abakan, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to indicate the importance of measures on diagnosis and maintenance of solar panel bypass diodes. The study involves the theoretical analysis of information data on bypass diodes and their troubleshooting. Consideration is given to solar panel defects arising from faulty bypass diodes. The study uses computer simulation in PVSYST program, simulates bypass diode faults on YL-250P-29b solar panel and performs bypass diode diagnostic by the methods of short-circuit current analysis at partial shading and idle voltage parameter under normal conditions. It is determined that the methods of thermal imaging diagnostics (including those using a drone) and visual inspection are not accurate troubleshooting tools for faulty bypass diodes. The analysis methods of short-circuit current at partial shading and the idle voltage parameter under normal conditions are applicable for small solar power plants. They also can be used for the diagnosis of bypass diodes of solar cell arrays assembled from spare parts as well as for tools and devices at large solar power plants. The method of thermal imaging diagnostics using an external source is recommended to use for full fault diagnosis of bypass diode breaks in large solar power plants.

Keywords: solar power plant, bypass diodes, bypass diode diagnostics, thermal imaging diagnostics, electroluminescence, visual inspection

Information about the article: Received October 09, 2019; accepted for publication November 12, 2019; available online December 28, 2019.

For citation: Shvets SV, Baishev AV. Bypass diode function in solar panels and their diagnostic methods. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1187–1202. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1187-1202

1. ВВЕДЕНИЕ

Представленные на рынке солнечные панели (СП) по заверениям производителей имеют срок службы порядка 25 лет и считаются практически необслуживаемыми. Рекомендуют лишь в случае сильного загрязнения поверхности СП проводить их чистку, при этом вмешательство в электрическую часть не предполагается на всем сроке службы.

Практика показывает, что СП нельзя считать необслуживаемыми, т.к., несмотря на простую конструкцию, в некоторых элементах СП могут возникать дефекты, негативно отражающиеся на производительности солнечной электростанции (СЭС).

В частности, большое внимание стоит уделять диагностике неисправности шунтирующих диодов (ШД), являющихся неотъемлемой частью большинства кремниевых СП. ШД выполняют как функции защиты СП в условиях частичного затенения, так и повышают эффективность в данных обстоятельствах. ШД не допускают рассеивания мощности в затененных солнечных ячейках, предохраняют СП от ускоренной деградации и преждевременного выхода из строя [1].

ШД расположены в диодной коробке (ДК) на оборотной части СП и работают в достаточно жестких условиях. Например, исследования показывают, что в солнечные летние дни температура внутри ДК достигает значений более 70°С, что ведет к увеличению тока утечки через ШД и порой провоцирует плавление *p-n* перехода с последующим выходом из строя как ШД, так и всей СП [2].

Понимая важность обозначенной роли ШД в составе СП, являются актуальными исследования в области поиска методов диагностики этих элементов, а также разработки мероприятий по продлению их срока службы.

Особо актуальна эта тема в связи с тем, что в Российской Федерации с недавнего времени появляется все больше как малых, так и больших СЭС, где эта проблема может проявить себя.

2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целями исследования являются обозначение важности проведения мероприятий по диагностике и поддержанию в исправном состоянии ШД, входящих в состав СП, рассмотрение методов их диагностики для промышленных и малых СЭС, имитация основных неисправностей ШД на СП и проведение их диагностики одним из методов.

3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

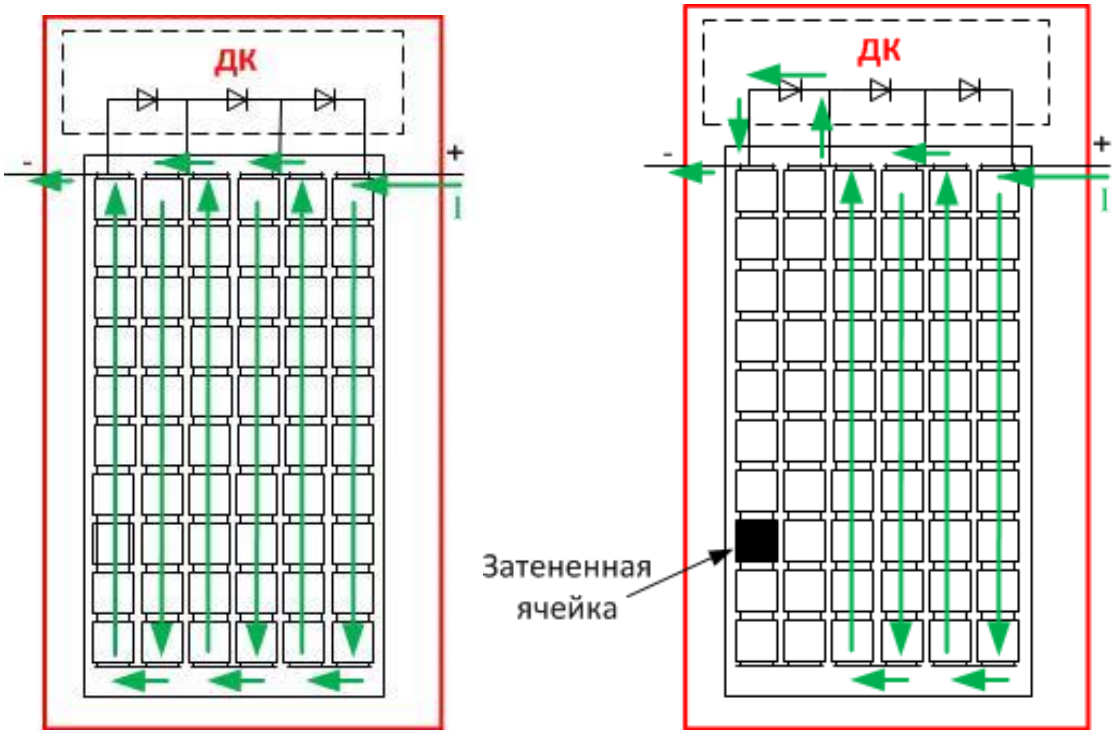
Главная задача ШД состоит в улучшении производительности СП в условиях частичного затенения и сохранении ее от образования локальных перегревов (ЛП) или так называемых «горячих точек».

ШД включаются в состав СП в разном количестве и имеют различную конфигурацию: как с перекрытием зон действия, так и действующие независимо [3]. Наиболее часто в составе кремниевых СП встречаются 3 ШД, не имеющих общих зон действия (рис. 1 *a, b*).

В нормальном режиме (рис. 1 *a*) ШД заперт прямым для солнечных ячеек и обратным для ШД напряжением и практически не оказывает влияния на работу СП.

В случае, когда один из солнечных элементов в группе затенен (рис. 1 *b*), затененная ячейка ведет себя как нагрузка для цепи [4], ограничивает ток и оказывается под обратным напряжением, которое открывает ШД и тем самым создается обходной путь для течения тока в СП.

Мировая практика эксплуатации СЭС показывает, что ШД нередко выходят из строя. Так, например, исследование [5] показало, что из 1272 СП, находящихся в эксплуатации 4 года, 593 (47%) имели неисправные ШД.



a *b*

Рис. 1. Работа шунтирующего диода в разных условиях: a – в нормальных условиях (шунтирующий диод не оказывает влияния на работу солнечной панели); b – в условиях возникновения частичного затенения (шунтирующий диод создает путь для тока в обход группы, имеющей затенение)
Fig. 1. Bypass diode operation in different conditions: a – normal conditions (bypass diode does not affect the operation of the solar cell array); b – partial shading (bypass diode creates a path for the current to bypass the shaded group)

Среди причин возникновения дефектов ШД выделяют перенапряжение, например, вследствие грозовых явлений либо перегрева [2]. Встречаются и случаи производственного брака [6].

Можно выделить два вида неисправностей ШД: его обрыв и короткое замыкание.

Обрыв ШД проявляет себя только в условиях возникновения частичного затенения на группе солнечных элементов (при нормальной освещенности влияния на работу СП не оказывает), когда этот элемент перестает генерировать электроэнергию и начинает рассеивать мощность, образуя ЛП [1].

В свою очередь, ЛП может стать причиной таких необратимых дефектов СП как растрескивание стекла СП, разрушение ячеек, ускоренная деградация СП, изменение цвета ламинирующей пленки, расслоение элементов модуля [7]. В худшем варианте ЛП могут стать причиной возгорания СП [2].

Стоит отметить, что такие дефекты как расслоение элементов СП и растрескивание ее стекла приводят к разгерметизации СП и тому, что изоляция как солнечных ячеек от атмосферных воздействий, так и электрическая изоляция СП (особенно во влажную погоду) уже не являются достаточными для обеспечения должных условий эксплуатации СП и не обеспечивают необходимый уровень электробезопасности для обслуживающего персонала. К тому же разгерметизация СП приводит к попаданию внутрь ее влаги, и к вышеперечисленным дефектам добавляется еще и коррозия металлических элементов СП, которая со временем разрушает их и необратимо выводит модуль из строя [7].

Короткое замыкание ШД равносиль-

но нахождению его в постоянно включенном состоянии (рис. 1 *b*), как при нормальной освещенности, так и в условиях частичного затенения.

Короткое замыкание ШД не несет в себе разрушительных последствий, но приводит к снижению выработки за счет вывода из работы части солнечных элементов СП и ускоряет их деградацию [2, 8, 9].

Среди методов диагностики неисправностей ШД в составе СП можно выделить следующие способы:

– визуальная инспекция [7];

– метод тепловизионной диагностики [5, 7];

– аналитика вольтамперных характеристик (ВАХ) СП [3, 7, 8, 10];

– различные вариации и синтез вышеперечисленных методов (например, тепловизионная диагностика с использованием внешнего источника) [11, 12].

Визуальная инспекция – это метод поиска видимых дефектов СП: вздутие подложки, изменение цвета ячеек, следов нарушения изоляции и ожогов модуля, мест его разгерметизации, трещин солнечных ячеек и т.п. [7]. Метод прост и эффективен, но с его помощью можно найти далеко не все дефекты СП и ШД. В частности, неисправности ШД диагностировать этим способом сложно: можно лишь предполагать о них по косвенным видимым признакам, наиболее ярким из которых является возникновение дефекта диодной коробки.

Большую эффективность и точность имеет метод тепловизионной диагностики (рис. 2), он является достаточно распространенным способом инспекции СП во всем мире, т.к. с его помощью можно определить многие проблемы СП, в частности неисправный ШД.

Методы тепловизионной диагностики можно разделить на два:

– ручная тепловизионная съемка;

– тепловизионная съемка с использованием коптера.

Установлено [13], что для получения термографического изображения, отражающего реальное состояние СП, при съемке необходимо придерживаться следующих правил:

1) горизонтальное выравнивание камеры относительно поверхности СП должно находиться в пределах $\alpha \pm 30°$ относительно перпендикуляра к ее поверхности (рис. 3);

2) вертикальное выравнивание камеры относительно поверхности СП должно быть близким к углу падения солнечного излучения на ее поверхность;

3) проводящему обследование необходимо не допускать попадания тени на поверхности исследуемой СП;

4) проводить съемку с разных ракурсов (в том числе с оборотной стороны);

5) проводить обследование в ясные дни с инсоляцией на уровне ≥650 Вт/м^2;

6) использовать тепловизор с температурным разрешением ≥0,08°С и разрешением объектива ≥320x240 – для больших (промышленных) массивов СП, для малых массивов ≥ 160x120.

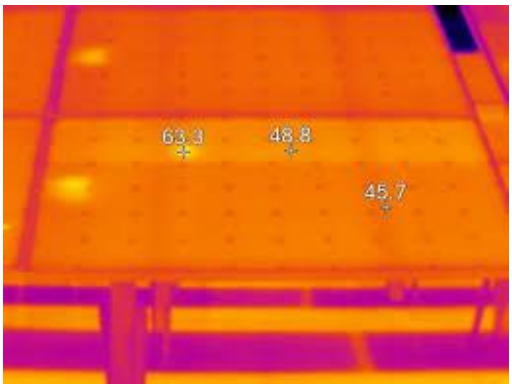


Рис. 2. Тепловизионный снимок солнечной панели
Fig. 2. Thermal image of the solar cell array

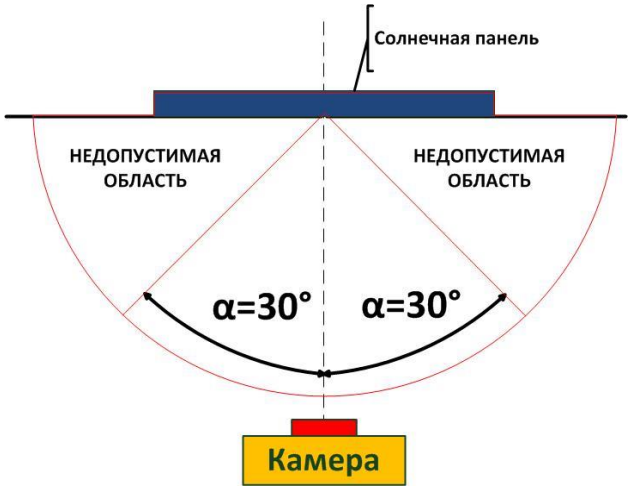


Рис. 3. Допустимые области расположения тепловизионной камеры
Fig. 3. Valid thermal vision camera locations

Ручная тепловизионная съемка подходит более для обследования небольших СЭС малой площади, где СП расположены на доступной для человека высоте, т.е. не выше 2,5 м. Производить тепловизионную съемку более высоких конструкций без применения дополнительных средств достаточно трудно, в частности, будет сложно подобрать соответствующий угол обзора [13, 14].

Тепловизионная съемка при помощи коптера является более быстрым способом обследования СП даже на крупных СЭС. По сравнению с ручной тепловизионной съемкой, тепловизионная съемка при помощи коптера (с установленной на него целевой нагрузкой в виде тепловизионной камеры) имеет ряд преимуществ:

1) существенно более высокая скорость обследования и анализа результатов;

2) отсутствие ограничений в обследовании массивов СП любых габаритов;

3) зачастую кадры тепловизионных снимков с коптера имеют привязку к координатам GPS/Глонасс, что существенно облегчает определение месторасположения дефектной СП;

4) съемка проводится с заданными параметрами, нет необходимости постоянно настраивать углы обзора.

При всех своих плюсах, у метода простой тепловизионной съемки есть и существенный недостаток: с его помощью не всегда возможно определить обрыв ШД. Он будет зафиксирован только в случае, если группа, которую защищает дефектный ШД, будет частично затенена, т.к. только тогда в ней будет фиксироваться выделение тепла, соответственно, в условиях нормальной освещенности неисправный ШД не будет выявлен.

Для того чтобы точно определить обрыв ШД, тепловизионную съемку совмещают с подачей напряжения обратного смещения и тока от внешнего источника в темное время суток, когда СП не производит электроэнергию.

В случае если ШД имеет обрыв, ток будет протекать через группу, которую он защищал, и нагревать солнечные элементы. Пример изображения массива с СП, в которой есть ШД, имеющий обрыв, показан на рис. 4.

Этим же методом можно найти и короткое замыкание ШД, поменяв полярность внешнего источника в сторону прямого смещения; нагреваться будут солнечные элементы, защищаемые исправным ШД, а солнечные элементы, защищенные ШД, находящиеся в состоянии короткого замыкания, – нет.

Еще одни методом диагностики является аналитика параметров ВАХ СП, в частности по показаниям U_{xx} и I_{SC} в различных условиях. Этот метод является мощным инструментом диагностики, с помощью которого можно определить многие

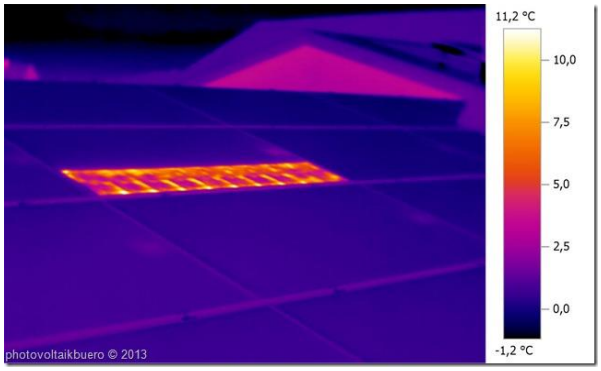


Рис. 4. Тепловизионное изображение панели с шунтирующим диодом, имеющим обрыв
Fig. 4. Thermal image of a panel with a bypass diode break

неисправности СП, в том числе обнаружить неисправный ШД.

Обнаружить короткозамкнутый ШД можно сравнением U_{xx} проверяемой СП с параметрами U_{xx}:

– эталонной СП;

– полученным аналитически на основании паспортных данных СП параметром U_{xx} для условий, в которых проводилась проверка.

Допуская то, что солнечные ячейки одинаковы, а также с учетом того, что они соединены в СП последовательно и при этом разделены на равные по количеству солнечных ячеек группы, каждую из которых защищает отдельный ШД, можно утверждать, что U_{xx}-панели с короткозамкнутым ШД будет ниже U_{xx} СП в тех же условиях, но с исправными ШД на уровень напряжения шунтированной группы ячеек ΔU, равный:

$$\Delta U = \frac{U_{xx}}{n} \cdot N \cdot Z, \qquad (1)$$

где U_{xx} – напряжение холостого хода СП, В; N – число ячеек в закороченной ШД группе, шт.; Z – число шунтированных групп, шт.; n – число ячеек в модуле, шт.

На кривой ВАХ короткозамкнутый ШД в СП сдвинет ее по оси напряжения на уровень ΔU от $U_{xx\,N}$ до $U_{xx\,CL}$ аналогично тому, как это изображено на рис. 5.

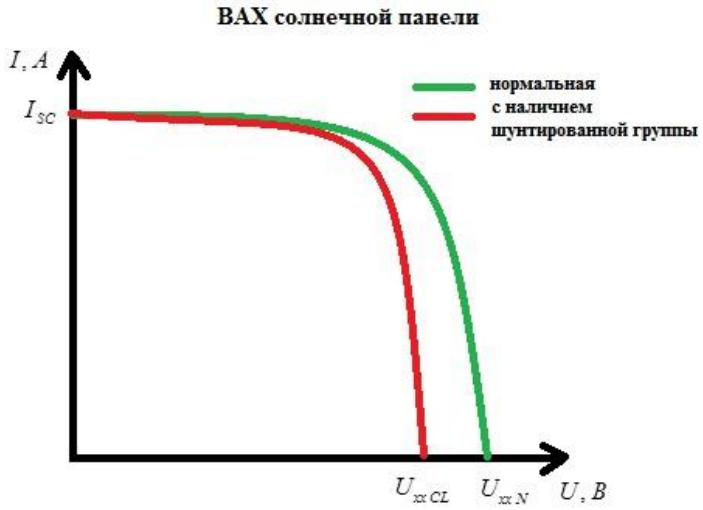


Рис. 5. Вид вольтамперной характеристики солнечной панели с короткозамкнутым шунтирующим диодом
Fig. 5. View of the current-voltage diagram of a solar cell array with a short-circuited bypass diode

Определить обрыв ШД можно, сверяя I_{SC} СП в условиях искусственно созданного затенения в группе солнечных элементов со значением I_{SC} СП без затенения. При этом число групп солнечных элементов определяется количеством ШД, а затенение производится куском светонепроницаемого материала (например, картона) определенных размеров для каждой группы солнечных элементов поочередно.

Важно, что под «затенением» в работе понимается так называемая «жесткая тень» на поверхности СП, которая не пропускает свет к ее поверхности.

Для поиска обрыва ШД (согласно рис. 6) изначально при отсутствии затенения (точка «0» на рис. 6.) фиксируется I_{SC} СП в условиях нормальной освещенности. Затем затеняющий предмет помещают в 1, 2, затем 3 группу солнечных элементов, при этом фиксируя I_{SC} СП при наличии затенения в каждой из них.

Далее, если существует обрыв в одном из 3 ШД, защищающих солнечные элементы в СП, изображенной на рис. 6, I_{SC} будет существенно падать при затенении группы солнечных элементов, в которой есть обрыв ШД. То есть будет наблюдаться резкое снижение тока от уровня «$I_{SC,N}$» до уровня «$I_{SC,D}$» по аналогии с тем, как это показано на рис. 7.

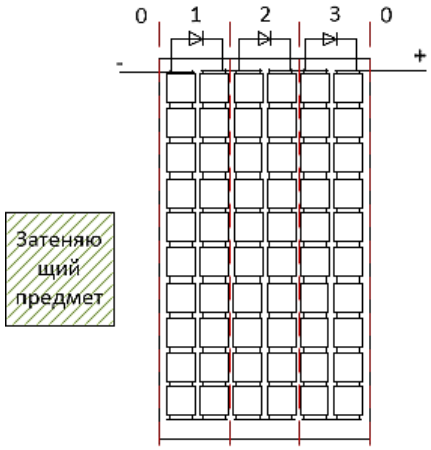


Рис. 6. Методика диагностики обрыва шунтирующего диода
Fig. 6. Diagnostic methods of bypass diode break

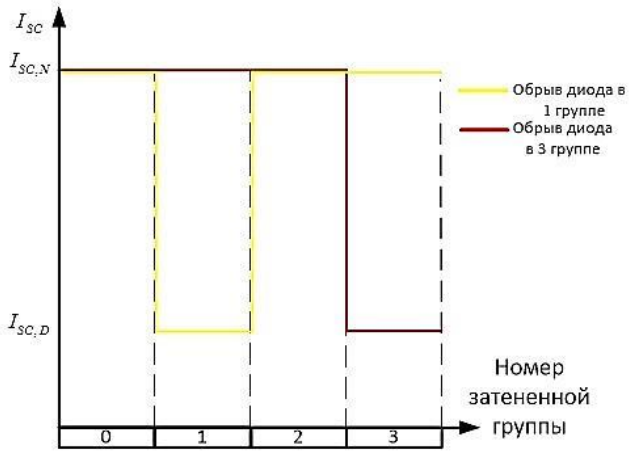


Рис. 7. Изменение тока короткого замыкания от числа затененных групп в панели с 3 шунтирующими диодами, некоторые из которых неисправны
Fig. 7. Variation of short circuit current versus the number of shaded groups in a 3 bypass diode solar cell array where some of diodes are faulty

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализируя методы диагностирования ШД, можно сказать о том, что для малого количества СП (например, в составе частных СЭС) подходит метод анализа параметров U_{xx} при нормальных условиях для диагностики замкнутых ШД и метод анализа I_{SC} в условиях затенения для проверки обрывов ШД. Также эти методы можно рассматривать для проверки СП, находящихся в запасных частях, инструментах, приспособлениях (ЗИП) на крупных СЭС.

Рассматривать этот метод диагностики для СП, установленных на крупной СЭС, не имеет смысла, т.к. способ такой проверки достаточно трудоемок и требует вывода из работы большого числа СП на длительный срок, что несет материальный ущерб для станции.

В результате анализа установлено, что подходящими для диагностики крупных СЭС являются методы тепловизионной съемки ручной и с применением коптера, а также с использованием внешнего источника.

Метод простой тепловизионной съемки проводят в дневное время, при этом существует вероятность получения ложных результатов вследствие того, что поверхность СП при неправильном ориентировании тепловизора своей отражающей способностью будет влиять на результаты съемки. К тому же этот метод сравнительно замедлен.

Диагностика с применением коптера – самый быстрый способ диагностики крупной СЭС и имеет преимущества перед простой тепловизионной съемкой в скорости, к тому же зачастую такая съемка проводится с привязкой изображений СЭС к геолокации, что существенно упрощает поиск места неисправности.

Методы тепловизионной диагностики и с применением коптера имеют существенный недостаток в том, что не могут определить обрыв ШД при нормальных условиях. Для его обнаружения при помощи тепловизора требуется наличие загрязнения на группе солнечных элементов, которые защищает ШД. Учитывая вероятностный характер появления загрязнения на поверхности СП, а также тот факт, что диагностика проводится один раз в определенный период, например, существует рекомендация тепловизионной проверки СЭС раз в несколько лет, можно сказать о том, что неисправность ШД может быть не установлена, что несет в себе определенные риски.

Поэтому для диагностики как обрыва ШД, так и его короткого замыкания стоит рассматривать метод тепловизионной съемки с использованием внешнего источника. Ко всему прочему, диагностика таким методом проводится, как правило, в ночное время, когда градиент температур поверхности СП и окружающей среды очень четко обозначает все изъяны проверяемых СП на тепловизионном изображении.

Рассмотрим подробнее метод анализа параметров U_{xx} при нормальных условиях для диагностики замкнутых ШД и метод анализа I_{SC} в условиях затенения для проверки оборванных ШД. В качестве объекта исследования будет выступать СП YL-250P-29b. Сравнивать параметры исследуемой СП предполагается с параметрами, рассчитанными на основании ее паспортных данных [15], и сведениями об условиях, в которых производится диагностика.

Для того чтобы определить показания солнечной радиации на поверхности СП, воспользуемся следующим соотношением [16]:

$$I_{SC}(G) = \frac{I_{SC}^*}{G^*} \cdot G, \qquad (2)$$

где I_{SC}^* – ток короткого замыкания СП, указанный для условий STC, A; G^* – уровень инсоляции на поверхности СП в условиях $STC = 1000 \frac{Bm}{м^2}$.

Используя соотношение (2), можно с достаточной точностью по показанию $I_{SC}(G)$ определять солнечную радиацию G

на поверхности незатененной СП в разных условиях ее расположения. Стоит отметить, что на уровень G сильно влияет облачность, поэтому необходимо проводить диагностику в ясные дни.

Далее определим, при каком уровне G стоит производить диагностику обрыва ШД в СП, а также – сколько ячеек необходимо затенить в группе СП для точной диагностики.

Для этого прибегнем к программе PVSYST, в которой, выбрав в качестве исследуемой СП YL-250P-29b, укажем для условий моделирования отсутствие ШД, что равносильно их обрыву.

Далее определим показания $I_{SC}(G)$ для различных условий:

– нормальной освещенности всей поверхности СП;

– когда в СП в одной группе затеняется: 1, 2, 10, 20 шт. солнечных элементов.

Для наглядности полученные результаты представим в табличном виде (табл. 1), где также определено отклонение $I_{SC}(G)$ СП в условиях затенения от $I_{SC}(G)$ в условиях нормальной освещенности.

Анализируя данные табл. 1, можно сказать о том, что чем выше уровень G, тем ярче проявляет себя обрыв ШД даже при небольшом количестве затененных ячеек (1–2 шт.). Но с большей легкостью и при меньшем уровне G можно диагностировать этот дефект, используя для затенения затеняющие предметы размерами, позволяющими затенить ≥ 2 солнечных ячеек в группе. Стоит учесть, что уровень G на поверхности СП для диагностики стоит выбирать исходя из условия $G \geq 600 \frac{Вт}{м^2}$.

Произведем проверку на основании указанных выше тезисов СП YL-250P-29b на предмет обрыва ШД и установим, насколько отличаются показания G:

Таблица 1

Зависимость $I_{SC}(G)$ в условиях частичного затенения для разных уровней G и разного числа затененных солнечных элементов

Table 1

$I_{SC}(G)$ dependence under partial shading for different levels G and various numbers of shaded solar cells

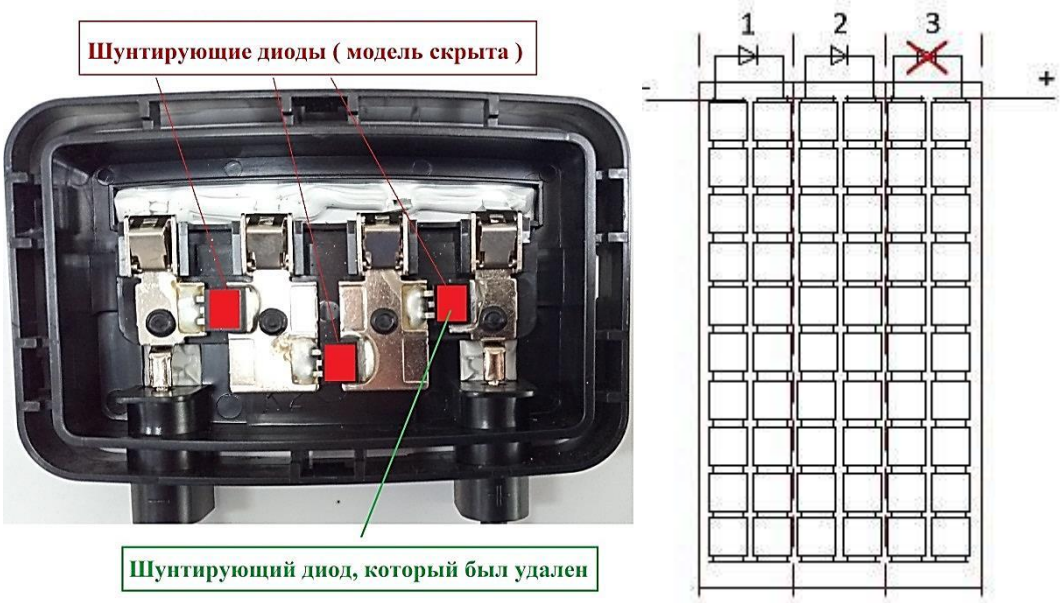
Наличие затенения на группе солнечных элементов с неисправным шунтирующим диодом	$I_{SC}(G), A$				
	$G = 200 \frac{Вт}{м^2}$	$G = 400 \frac{Вт}{м^2}$	$G = 600 \frac{Вт}{м^2}$	$G = 800 \frac{Вт}{м^2}$	$G = 1000 \frac{Вт}{м^2}$
нет затенения	1,8	3,6	5,3	6,5	8,9
затеняется 20 шт.	0,4	0,7	1,2	1,5	1,9
отклонение	1,4	2,9	4,1	5	7
затеняется 10 шт.	0,45	0,95	1,3	1,6	2
отклонение	1,35	2,65	4	4,9	6,9
затеняется 2 шт.	1,4	1,9	2,4	2,4	2,5
отклонение	0,4	1,7	2,9	4,1	6,4
затеняется 1 шт.	1,75	3,3	4,2	4,8	5,1
отклонение	0,05	0,3	1,1	1,7	3,8

– G_C – рассчитанный в результате использования соотношения (2) по току $I_{SC}(G)$ в условиях нормальной освещенности поверхности СП;

– G_M – измеренный датчиком солнечной радиации, направленным в южную сторону под углом 42º.

Проверке подвергалась СП с одним удаленным ШД, что имитирует его обрыв (рис. 8). Испытание с затенением 1 и 10 солнечных элементов проведено аналогично тому, как это продемонстрировано для проведения затенения 2 и 20 солнечных элементов на рис. 9.

Результаты исследования представим для наглядности в табличном виде (табл. 2).



a *b*

Рис. 8. Исследуемая солнечная панель на предмет наличия обрыва шунтирующих диодов: a – внешний вид диодной коробки и шунтирующего диода, который был удален, b – удаленный шунтирующий диод на схеме
Fig. 8. Solar cell array under examination in order to identify the presence of bypass diode breaks: a – external view of the diode box and removed bypass diode, b – removed bypass diode in the circuit



a *b*

Рис. 9. Процесс исследования солнечной панели на предмет обрыва шунтирующего диода в группе, имеющей обрыв шунтирующего диода: a – затенение 2 солнечных элементов; b – затенение 20 солнечных элементов
Fig. 9. Examination process of a solar cell array in order to identify a bypass diode break in a group having a broken bypass diode: a – shading of 2 solar cells; b – shading of 20 solar cells

Таблица 2

Зависимость $I_{SC}(G)$ от затенения (на солнечной панели) с наличием обрыва шунтирующего диода

Table 2

$I_{SC}(G)$ dependence on (solar cell array) shading in the presence of bypass diode break

Влияние разного количества затененных ячеек на $I_{SC}(G)$ солнечной панели с шунтирующим диодом, имеющим обрыв	$I_{SC}(G), A$	
	$G_M = 991\frac{Вт}{м^2}$	$G_C = 929\frac{Вт}{м^2}$
нет затенения в СП	8,17	
затеняется 20 шт. солнечных элементов в группе	0,93	
отклонение	7,24	
затеняется 10 шт. солнечных элементов в группе	1,35	
отклонение	6,82	
затеняется 2 шт. солнечных элемента в группе	3,32	
отклонение	4,85	
затеняется 1 шт. солнечный элемент в группе	8,05	
отклонение	0,12	

Как видно из табл. 2, значения G_C и G_M несколько расходятся, но эта разница составляет порядка 6% и может быть обусловлена погрешностями в измерительных приборах либо отсутствием учета ряда других факторов при расчетах G_C по соотношению (2).

Кроме того, данные табл. 2 подтверждают сформированную на основании данных моделирования в программе PVSYST рекомендацию по необходимости использования для диагностики затеняющего предмета с размерами ≥ 2 солнечных ячеек в группе.

Для поиска короткозамкнутых ШД стоит изначально оценить напряжение холостого хода СП в условиях планируемой диагностики, что необходимо в случае отсутствия эталонной СП для примерной оценки нормального значения.

В силу того, что в большей части кремниевых СП применяется 3 ШД, то в случае короткого замыкания каждый неисправный ШД выводит из работы сразу треть солнечных ячеек. Соответственно, если измеренное значение U_{xx} СП отличается в меньшую сторону от расчетного значения $U_{xx}(T_C)$ примерно на $\frac{1}{3}$ и более от значения, полученного при расчете, то это дает весомые основания полагать о наличии как минимум одного закороченного ШД.

Для оценки примерного значения U_{xx} СП при заданных условиях можно принять допущение о том, что на U_{xx} влияет исключительно температура солнечного элемента. При этом за температуру солнечного элемента принимают температуру, измеренную с оборотной стороны СП.

Далее, используя температурный коэффициент, указанный в паспорте СП, можно определить примерный уровень U_{xx} для измеренной температуры ячейки:

$$U_{xx}(T_C) = U_{xx}(T_{STC}) + \Delta U_{xx}(T_C), \qquad (3)$$

где $U_{xx}(T_C)$ – напряжение холостого хода солнечной панели для данной температуры солнечной ячейки, В; $U_{xx}(T_{STC})$ – напряжение холостого хода в условиях STC, В; $\Delta U_{xx}(T_C)$ – отклонение напряжения холостого хода при измеренной температуре ячейки от напряжения холостого хода в условиях STC, В. Определяется как

$$\Delta U_{xx}(T_C) = (T_C - T_{STC} \cdot \alpha), \qquad (4)$$

где T_C – температура солнечной панели с оборотной стороны; T_{STC} – температура в условиях $T_{STC} = 25°C$; α – температурный коэффициент солнечной панели по напряжению.

Теперь, используя указанную методику, проведем исследование СП на предмет наличия закороченного ШД.

Используя паспортные данные СП YL-250P-29b и соотношения (3)–(4), произведем аналитический расчет $U_{xx}(T_C)$, приняв за температуру солнечных элементов температуру, измеренную с оборотной стороны СП, которая при температуре окружающей среды равной $24°C$ составляет $T_C = 40°C$.

Кроме того, учтем, что для рассматриваемой СП напряжение холостого хода в условиях $U_{xx}(T_{STC}) = 38,4\ B$, а температурный коэффициент составляет

$$\alpha = -0,33\frac{\%}{°C}.$$

Тогда:

$$\Delta U_{xx}(T_C) = (40°C - 25°C \times$$

$$\times(-0,33\frac{\%}{°C})) = -4,95\ B;$$

$$\Delta U_{xx}(T_C) = 38,4\ B + (-4,95\ B) = 33,45\ B.$$

Далее измерим $U_{xx,M}$ в условиях, когда исправны все ШД, а также моделируя ситуации, когда закорочено разное число ШД. Закороченные ШД сымитированы путем установки медного шунта параллельно существующим ШД (рис. 10).

По результатам замеров определим разницу Δ между $U_{xx,M}$ и $U_{xx}(T_C)$ для каждого варианта. Результаты проведенного опыта представлены в табл. 3.

Как видно из данных табл. 3, при нормальных условиях значения расчетного $U_{xx}(T_C)$ и измеренного $U_{xx,M}$ отличаются примерно на 3,3%, что является достаточно точным показателем и говорит о возможности использования расчетного метода для примерной оценки нормального значения напряжения холостого хода для измеренной температуры солнечной ячейки.

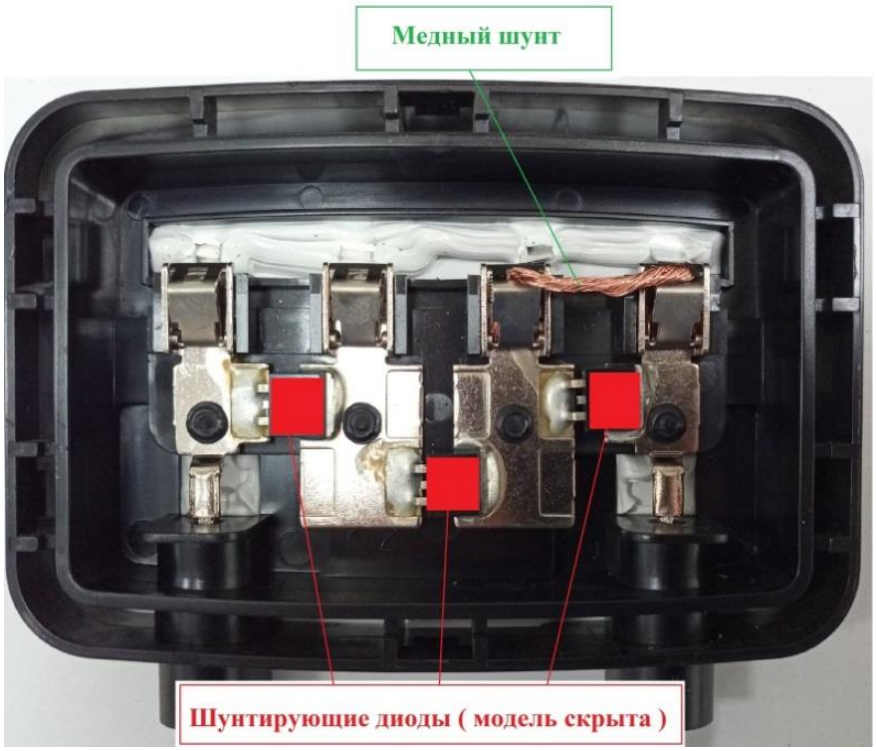


Рис. 10. Имитация закороченного шунтирующего диода
Fig. 10. Simulated shorted bypass diode

Таблица 3

Зависимость U_{xx} от числа закороченных шунтирующих диодов

Table 3

U_{xx} dependence on the number of shorted bypass diode

Число закороченных шунтирующих диодов	$U_{xx,M}, B$	$U_{xx}(T_C), B$	$\Delta = U_{xx,M} - U_{xx}(T_C), B$
0	34,6	33,45	1,15
1	23		-10,45
2	11,5		-21,95
3	0		-33,45

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Крупные СЭС, существующие в Российской Федерации, были введены в эксплуатацию сравнительно недавно и в небольшом количестве, после введения программы поддержки возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ) по механизму договоров поставки мощности генерирующих объектов на основе возобновляемых источников энергии (ДПМ ВИЭ). Небольшие СЭС также мало распространены на территории нашей страны и, до недавнего времени, их широкого применения, даже для создания автономных систем электроснабжения в удаленных от централизованной электрической сети, не было. Это объясняет ряд факторов, в том числе основной: высокие единовременные затраты на приобретение оборудования СЭС при отсутствии опыта применения таких систем в Российской Федерации и, как следствие, отсутствие уверенности в надежности электроснабжения с применением СЭС.

Однако положительный опыт эксплуатации того малого числа автономных СЭС, что присутствуют в Российской Федерации, на фоне снижения стоимости СЭС, все больше располагает к расширению их применения. Бесшумность, малообслуживаемость, простота эксплуатации и отсутствие необходимости в хранении и заправке топлива – те качества, за которые СЭС ценят в удаленных от электросетей районах.

В настоящее время диагностике СП в Российской Федерации уделяется малое внимание, бытует мнение об их надежности и необслуживаемости на всем протяжении срока службы. Однако, например, опыт Японии, Германии и США, где СЭС различных масштабов существуют уже достаточно долго, демонстрирует, что надежность СП следует ставить под вопрос. Практика показывает, что они, также как и практически любое оборудование, требуют периодического обследования и своевременного устранения дефектов, что относится, в том числе и к диагностике ШД.

Снижение эффективности СП, возникновение опасности поражения электрическим током, увеличение рисков экономического ущерба от потери оборудования – это малый перечень проблем, которые потенциально несут в себе неисправные ШД.

Диагностика ШД – непростая задача, особенно в условиях, когда вскрытие ДК запрещается производителем. Следовательно, необходимо применять для диагностики методы, позволяющие судить о неисправности ШД без вскрытия ДК по косвенным признакам с достаточной точностью. Такие методы диагностики ШД и были рассмотрены в работе, их можно условно разделить по размерам СЭС.

Для малых СЭС диагностику ШД можно проводить, используя анализ параметров U_{xx} при нормальных условиях для диагностики замкнутых ШД, и метод анализа I_{SC} в условиях затенения для поиска обрывов ШД. Метод применим и для круп-

ных СЭС для диагностики ШД в СП, хранящихся в ЗИП. Для диагностики находящихся в работе СП на крупных СЭС этот метод не подходит, т.к. требует вывода из работы СП.

Диагностика ШД СП в составе крупных СЭС требует применять методы бесконтактной диагностики либо диагностики в ночное время. Такими методами являются: визуальная инспекция, тепловизионная диагностика, она же с применением внешнего источника. Перспективно направление поиска неисправных ШД с использованием автоматизированных систем, в том числе использующих технологии искусственных нейронных сетей.

Среди методов диагностики неисправных ШД стоит выделить метод тепловизионной диагностики с применением внешнего источника. Его можно применять для поиска как закороченных ШД, так и оборванных ШД, к тому же такая диагностика проводится в ночное время, когда градиент температур позволяет увидеть неисправности более выраженно. Тепловизионная диагностика, по сравнению с тепловизионной диагностикой с применением внешнего источника, менее точна, например, в случае, когда на группе солнечных элементов с ШД, имеющим обрыв, нет выраженного жесткого затенения.

Визуальная инспекция в контексте вопроса поиска неисправных ШД практически бессильна.

Библиографический список

1. Minh Quan Duong, Sava G.N., Ionescu G., Necula H., Leva S., Mussetta M. Optimal bypass diode configuration for PV arrays under shading influence // International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe) (Milan, 6–9 June 2017). Milan: IEEE, 2017. P. 1–5. https://doi.org/10.1109/EEEIC.2017.7977526
2. Woo Gyun Shin, Suk Whan Ko, Hyung Jun Song, Young Chul Ju, Hye Mi Hwang, Gi Hwan Kang. Origin of Bypass Diode Fault in c-Si Photovoltaic Modules: Leakage Current under High Surrounding Temperature // Energies. 2018. Vol. 11. No. 2416. P. 1–11. https://doi.org/10.3390/en11092416
3. Ziar H., Nouri M., Asaei B., Farhangi S. Analysis of Overcurrent Occurrence in Photovoltaic Modules With Overlapped By-Pass Diodes at Partial Shading // IEEE Journal of Photovoltaics. 2014. Vol. 4. No. 2. P. 713–721.https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2292578
4. Izadian A., Pourtaherian A., Motahari S. Basic model and governing equation of solar cells used in power and control applications // Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (North Carolina 15–20 September 2012). North Carolina: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012. P. 1483–1488.
https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342639
5. Kato K. PVRessQ!: A Research Activity on Reliability of PV System from an user's viewpoint in Japan // Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems VI. 2011. Vol. 8112. P. 1–9. https://doi.org/10.1117/12.896135
6. Schneller E.J., Brooker R.P., Shiradkar N.S., Rodgers M.P., Dhere N.G., Davis K.O., et al. Manufacturing metrology for c-Si module reliability and durability Part III: Module manufacturing // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 59. P. 992–1016. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.215
7. Köntges M., Kurtz S., Packard C., Ulrike J. Performance and Reliability of Photovoltaic Systems Subtask 3.2. Review of Failures of Photovoltaic Modules // International Energy Agency. 2014 [Электронный ресурс]. URL: http://www.iea-pvps.org (21.04.2019).
8. Davarifar M., Rabhi A., Hajjaji A. Comprehensive Modulation and Classification of Faults and Analysis Their Effect in DC Side of Photovoltaic System // Energy and Power Engineering. 2013. Vol. 5. P. 230–236. https://doi.org/10.4236/epe.2013.54B045
9. Shin Woo-Gyun, Jung Tae-Hee, Ju Young-Chul, Chang Hyo-Sik, Kang Gi-Hwan. Analysis on thermal & electrical characteristics variation of PV module with damaged bypass diodes // Journal of the Korean Solar Energy Society. 2015. Vol. 35. Issue 4. P. 67–75. https://doi.org/10.7836/kses.2015.35.4.067
10. Dhimish M., Holmes V., Mehrdadi B., Dales M., Mather P. Detecting Defective Bypass Di-odes in Photovoltaic Modules using Mamdani Fuzzy Logic System // Journal of Electrical and Electronics Engineering. 2017. Vol. 17. Issue 5. P. 33–44.
11. Tsanakas J.A., Long D.Ha., Shakarchi F.Al. Advanced inspection of photovoltaic installations by aerial triangulation and terrestrial georeferencing of thermal/visual imagery // Renewable Energy. 2017. Vol. 102(A).P.224–233.
https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.046
12. Köntges M., Siebert M., Hinken D., Eitner U., Bothe K., Potthof T. Quantitative Analysis of PV-Modules by Electroluminescence Images for Quality Control // Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Hamburg, 21–25 September 2009). Hamburg, 2009. P. 3226–3231. https://doi.org/10.4229 / 24thEUPVSEC2009-4CO.2.3
13. Buerhop C., Jahn U., Hoyer U., Lerche B., Wittmann S. Machbarkeitsstudie zur. Überprüfung der

Qualität von Photovoltaik-Modulen mittels Infrarot-Aufnahmen // Bayerisches zentrum für angewandte energieforschung E.V. Abteilung Thermosensorik und Photovoltaik. 2007. P. 1–46. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sev-bayern.de/wp-content/uploads/2018/12/IR-Handbuch.pdf (21.04.2019).
14. Testo UK website // Testo Be sure [Электронный ресурс]. URL: https://www.testo.com/en-UK/ (16.07.2019).
15. Yingli YL250P-29b // Problems & Solutions [Электронный ресурс]. URL:https://manualzz.com/doc/11503449/yingli-yl250p-29b-data-sheet (16.07.2019).
16. Lorenzo E. Energy Collected and Delivered by PV Modules // Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. 2003. P. 905–970. https://doi.org/10.1002/0470014008.ch20

References

1. Minh Quan Duong, Sava GN, Ionescu G, Necula H, Leva S, Mussetta M. Optimal bypass diode configuration for PV arrays under shading influence. International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). 6–9 June 2017, Milan. Milan: IEEE; 2017, p. 1–5. https://doi.org/10.1109/EEEIC.2017.7977526
2. Woo Gyun Shin, Suk Whan Ko, Hyung Jun Song, Young Chul Ju, Hye Mi Hwang, Gi Hwan Kang. Origin of Bypass Diode Fault in c-Si Photovoltaic Modules: Leakage Current under High Surrounding Temperature. Energies. 2018;11(2416):1–11. https://doi.org/10.3390/en11092416
3. Ziar H, Nouri M, Asaei B, Farhangi S. Analysis of Overcurrent Occurrence in Photovoltaic Modules With Overlapped By-Pass Diodes at Partial Shading. IEEE Journal of Photovol-taics. 2014;4(2):713–721. https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2292578
4. Izadian A, Pourtaherian A, Motahari S. Basic model and governing equation of solar cells used in power and control applications. In: Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 15–20 September 2012, North Carolina. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2012, p. 1483–1488. https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342639
5. Kato K. PVRessQ!: A Research Activity on Reliability of PV System from an user's viewpoint in Japan. Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems VI. 2011;8112:1–9. https://doi.org/10.1117/12.896135
6. Schneller EJ, Brooker RP, Shiradkar NS, Rodgers MP, Dhere NG, Davis KO, et al. Manufacturing metrology for c-Si module reliability and durability Part III: Module manufacturing. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016;59:992–1016. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.215
7. Köntges M, Kurtz S, Packard C, Ulrike J. Performance and Reliability of Photovoltaic Systems Subtask 3.2. Review of Failures of Photovoltaic Modules. International Energy Agency. 2014. Available from: http://www.iea-pvps.org [Accessed 21st April 2018].
8. Davarifar M, Rabhi A, Hajjaji A. Comprehensive Modulation and Classification of Faults and Analysis Their Effect in DC Side of Photovoltaic System. Energy and Power Engineering. 2013;5:230–236. https://doi.org/10.4236/epe.2013.54B045
9. Shin Woo-Gyun, Jung Tae-Hee, Ju Young-Chul, Chang Hyo-Sik, Kang Gi-Hwan. Analysis on thermal & electrical characteristics variation of PV module with damaged bypass diodes. Journal of the Korean Solar Energy Society. 2015;35(4):67–75. https://doi.org/10.7836/kses.2015.35.4.067
10. Dhimish M, Holmes V, Mehrdadi B, Dales M, Mather P. Detecting Defective Bypass Di-odes in Photovoltaic Modules using Mamdani Fuzzy Logic System. Journal of Electrical and Electronics Engineering. 2017;17(5):33–44.
11. Tsanakas JA, Long DHa, Shakarchi FAl. Advanced inspection of photovoltaic installations by aerial triangulation and terrestrial georeferencing of thermal/visual imagery. Renewable Energy. 2017;102(A):224–233. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.046
12. Köntges M, Siebert M, Hinken D, Eitner U, Bothe K, Potthof T. Quantitative Analysis of PV-Modules by Electroluminescence Images for Quality Control. In: Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference. 21–25 September 2009, Hamburg. Hamburg; 2009, p. 3226–3231. https://doi.org/10.4229 / 24thEUPVSEC2009-4CO.2.3
13. Buerhop C, Jahn U, Hoyer U, Lerche B, Wittmann S. Machbarkeitsstudie zur. Überprüfung der Qualität von Photovoltaik-Modulen mittels Infrarot-Aufnahmen. Bayerisches zentrum für angewandte energieforschung E.V. Abteilung Thermosensorik und Photovoltaik. 2007:1–46. Available from: https://www.sev-bayern.de/wp-content/uploads/2018/12/IR-Handbuch.pdf [Accessed 21st April 2018].
14. Testo UK website. *Testo Be sure.* Available from: https://www.testo.com/en-UK/ [Accessed 16th July 2019].
15. Yingli YL250P-29b. *Problems & Solutions*. Available from: https://manualzz.com/doc/11503449/yingli-yl250p-29b-data-sheet [Accessed 16th July 2019].
16. Lorenzo E. Energy Collected and Delivered by PV Modules. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. 2003:905–970. https://doi.org/10.1002/0470014008.ch20

Критерии авторства

Швец С.В., Байшев А.В. 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

Shvets S.V., Baishev A.V. 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Швец Сергей Викторович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники
и автоматизированных систем,
Хакасский государственный университет
им. Н.Ф. Катанова,
655000, г. Абакан, ул. Ленина, 90, Россия;
e-mail: swsh@yandex.ru

Байшев Анатолий Викторович,
магистрант,
Хакасский государственный университет
им. Н.Ф. Катанова,
655000, г. Абакан, ул. Ленина, 90, Россия;
✉ e-mail: anatoly_bayshev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. Shvets,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department Computer Software and Automated Systems,
Khakass State University named after N.F. Katanov,
90, Lenin St., Abakan 655000, Russia;
e-mail: swsh@yandex.ru

Anatoliy V. Baishev,
Master Degree Student,
Khakass State University named after N.F. Katanov,
90, Lenin St., Abakan 655000, Russia;
✉ e-mail: anatoly_bayshev@mail.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.311
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1203-1211

Структурная модель процесса ректификации бинарной смеси в тарельчатой колонне

© А.Н. Гнатюк, М.П. Дунаев
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью статьи является получение данных, необходимых для синтеза оптимальных управляющих систем. Успешное решение задачи создания систем управления для тарельчатых ректификационных колонн, используемых в различных химико-металлургических процессах, требует построения математических моделей, позволяющих проводить исследования объектов на моделирующих установках. Аналитические решения систем управлений, описывающих процессы в колоннах, связаны со значительными вычислительными трудностями. Представляется целесообразным построение структурных схем в качестве исходного математического описания моделируемых ректификационных колонн. Использованы известные статические и динамические свойства тарельчатой ректификационной колонны для разделения бинарных смесей так, чтобы на их основе построить математические модели, удобные для синтеза автоматических управляющих устройств. Предполагаемая структурная схема представляет собой наборную модель объекта, позволяющую на ее базе получать для конкретных типоразмеров его элементов общее решение (с учетом нелинейных зависимостей в исследуемой системе). Проведено математическое описание процесса ректификации на основе материального баланса более летучего компонента с учетом кинетики массопередачи на тарелках.

Ключевые слова: система управления, ректификационная колонна, математическая модель, наборная модель объекта, автоматическое управляющее устройство, тарельчатая колонна

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

Для цитирования: Гнатюк А.Н., Дунаев М.П. Структурная модель процесса ректификации бинарной смеси в тарельчатой колонне. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 6. С. 1203–1211. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1203-1211

Structural model of binary mixture fractional distillation in a tray column

Aleksey N. Gnatyuk, Mikhail P. Dunaev
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the article is to obtain the data necessary for the synthesis of optimal control systems. The successful solution of the problem of creating control systems for tray distillation columns used in various chemical and metallurgical processes requires the construction of mathematical models that allow to carry out the study of objects on modeling facilities. Analytical solutions of control systems that describe the processes in columns involve significant computational difficulties. It seems useful to build structural diagrams as an initial mathematical description of the simulated fractionating distillation columns. The known static and dynamic properties of the tray distillation column are used to separate binary mixtures in the way that enables the construction on their basis mathematical models convenient for the synthesis of automatic control devices. The proposed block diagram is a typeset model of a facility, which serves the basis for obtaining a general solution for specific sizes of its elements (taking into account the nonlinear dependencies in the system under examination). A mathematical description of the fractionation process is given on the basis of the material balance of the more volatile component and consideration of the kinetics of mass transfer on the trays.

Ключевые слова: система управления, ректификационная колонна, математическая модель, наборная модель объекта, автоматическое управляющее устройство, тарельчатая колонна

Keywords: control system, fractionating distillation column, mathematical model, typeset facility model, automatic control device, tray column

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

For citation: Gnatyuk AN, Dunaev MP. Structural model of binary mixture fractional distillation in a tray column. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1203–1211. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1203-1211

1. ВВЕДЕНИЕ

Ректификация – один из наиболее эффективных методов разделения и очистки хлоридов циркония, гафния, висмута, ниобия и тантала [1]. Ректификационная колонна является наиболее часто встречающимся аппаратом в металлургии для разделения жидкофазных смесей в процессах рафинирования, дистилляции, а также получения компонентов воздуха (кислорода, азота, инертных газов). Она может служить типичным примером многостадийной противоточной разделительной системы. За счет подвода тепла в кипятильник в колонне создаются встречные потоки пара и жидкости. Межфазовый перенос происходит в несколько стадий, на каждой из которых пар обогащается более летучим компонентом, а жидкость – менее летучим. Реакции, лежащие в основе промышленного процесса ректификации, имеют сложный механизм и протекают в несколько параллельных и последовательных этапов [2, 3].

Успешное решение задачи создания систем управления для тарельчатых ректификационных колонн требует построения математических моделей [4, 5], позволяющих проводить исследования объектов на моделирующих установках.

Аналитические решения систем управлений, описывающих процессы в колоннах, связаны со значительными вычислительными трудностями. Представляется целесообразным построение структурных схем [6–8] в качестве исходного математического описания моделируемых ректификационных объектов управления.

Используем известные статические и динамические свойства тарельчатой ректификационной колонны для разделения бинарной смеси так, чтобы на их основе построить математические модели, удобные для синтеза автоматических управляющих устройств [9–11]. Проведем математическое описание процесса ректификации на основе материального баланса [12, 13] более летучего компонента с учетом кинетики массопередачи на тарелках.

2. ОПИСАНИЕ СХЕМЫ

На рис. 1 *а* показана элементарная схема ректификационной установки, состоящей из тарельчатой ректификационной колонны, кипятильника и дефлегматора. Требования к системе управления, стимулированные в общем виде: обеспечивать для заданных величины и состава питания разделяемой смеси F, количества образующегося пара V и потока флегмы L, величину потоков дистиллята D, кубового остатка B и их составов.

Для математического описания ректификационной колонны применим потарелочный метод, который состоит в построении модели отдельной ступени и повторении для всех остальных.

Учитываем наиболее характерные элементы моделей движения потоков на тарелке, равновесные соотношения, общий баланс потоков фаз, балансы по компонентам бинарной смеси тарельчатой ректификационной колонны. В качестве гидродинамических моделей тарелок принимаем: для жидкости – идеальное смешение, для пара – идеальное вытеснение [2, 3]. Идеальное смешение пара соответствует предположению о конденсации его на тарелке.

Сформулируем основные допущения и ограничения:

– исходная бинарная смесь подается в колонну в виде жидкости при температуре кипения;

– жидкость в колонне при температуре кипения, пар насыщенный, унос жидкости с тарелок отсутствует;

– конденсатор колонны полный;

– режим адиабатический;

– количеством паровой фазы в колонне, по сравнению с количеством жидкостной, можно пренебречь;

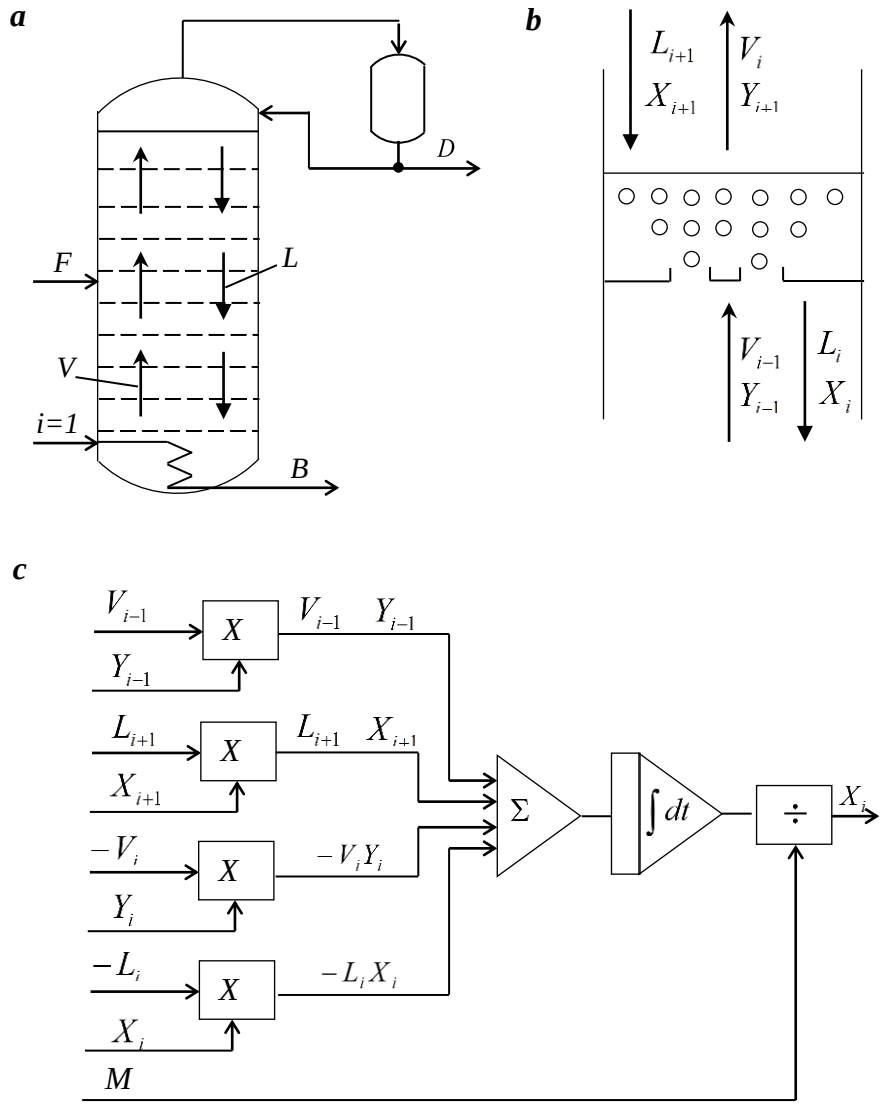


Рис. 1. Схема ректификационной установки: a – схема ректификационной установки; b – схема i-й тарелки; c – блок-схема для i-й ступени
Fig. 1. Diagram of the fractionating distillation setup: a – diagram of the distillation column; b – diagram of the i-tray; c – diagram of the i-step

– массопередача на тарелках эквимолярная;

– вся жидкость на тарелке сосредоточена в зоне массообмена и не изменяется в переходных режимах;

– давление на высоте колонны постоянное;

– в паровой фазе в зоне массообмена принимается полное вытеснение, а в жидкой – полное перемешивание.

При построении модели исходим из предположения, что в статическом режиме соблюдается постоянный мольный поток, т.е. количество молей пара и жидкости, поступающих и покидающих тарелку, не меняется по величине при переходе от тарелки к тарелке.

С учетом принятых допущений, ректификационную колонну представляем в виде системы, состоящей из взаимодействующих звеньев. Для испарительной секции (жидкость в кубе колонны и испаритель) и конденсационной (конденсатор, сборник флегмы, трубопроводы) справедливы уравнения эквивалентной теоретической тарелки (рис. 1 *b*), характеризуемой

равновесием между поднимающимся паром и жидкостью, покидающей данную ступень. Это равновесие для бинарной смеси на *i*-й ступени записывается следующим образом:

$$Y_i = \int (X_i), \quad (1)$$

где Y_i и X_i – соответственно, мольные доли для *i*-го компонента в газовой и жидкой фазах, характеризующие концентрацию легколетучего компонента в паровой фазе и жидкости.

Уравнение материального баланса легколетучего компонента (для *i*-й тарелки) (рис. 1 *b*) запишем в виде:

$$M_i\left(\frac{dX_i}{dt}\right) = L_{i+1}X_{i+1} + V_{i-1}Y_{i-1} - L_iX_i - V_iY_i. \quad (2)$$

Материальный баланс для всех тарелок по легколетучему компоненту описывается уравнением:

$$\sum_{i=0}^{i=n} M_i\left(\frac{dX_i}{dt}\right) = L_{i+1}X_{i+1} -_i \\ -L_iX_i + VY_{i-1} - VY + FX_f. \quad (3)$$

В уравнениях (2), (3) приняты обозначения: M – количество (масса) жидкости в тарелке, кмоль; L – количество жидкости, стекающей с тарелки, кмоль/ч; i – номер тарелки, считая от куба $i = 0$ для верхней, $i = n$; V – количество пара, уходящего с тарелки, кмоль/ч.

В уравнение материального баланса по легколетучему компоненту, составленное для питающей тарелки, вводим величину расхода питающего раствора, умноженную на соответствующую концентрацию FX_f.

Решая уравнение материального баланса (2) относительно концентрации X_i, можно найти состав жидкой фазы в тарелке. Блок-схема решения уравнения (2) для i-й ступени приведена на рис. 1 с.

Величины концентрации используются для определения скоростей отдельных реакций в уравнениях кинетики, статики и динамики.

Между поступающим потоком жидкости L_{i+1} и уходящим L_i существует емкостное запаздывание, величина постоянной которого τ зависит от геометрии тарелки и высоты перелива.

Пренебрегая запаздыванием в паровом потоке, запишем уравнения, связывающие потоки пара V и жидкости L:

$$V_{i-1} = V_i;\ \tau\frac{dL_i}{dt} = L_{i+1} - L_i. \quad (4)$$

Уравнения (1)–(4) описывают процесс, протекающий на любой из ступеней колонны, за исключением кипятильника.

Материальный баланс кипятильника можно составить, руководствуясь предположением, что скорость накопления данного компонента $\frac{d}{dt}(MX_0)$ равна поступлению с потоком жидкости с первой ступени L_1X_1 минус отбор с кубовым остатком L_0X_0 и испарением VY_0:

$$d(MX_0) = L_1X_1 - L_0X_0 - VY_0. \quad (5)$$

Величина парового потока V равна тепловому потоку q, подводимого к кипятильнику, отнесенному к скрытой теплоте парообразования λ:

$$V = q/\lambda. \quad (6)$$

При рассмотрении процесса ректификации величина теплового потока, подводимого к кипятильнику, и величина отбираемого кубового остатка L_0 предполагаются известными.

С учетом принятых допущений и ограничений, уравнения материального баланса в динамических режимах для частей колонны, расположенных выше и ниже тарелки питания и кипятильника, принимают вид:

$1 \le i \le f$ (первая тарелка)

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d}{dt}\left(MX_1\right) = L_2X_2 - L_1X_1 + VY_0 - VY_1; \\ &\tau\frac{dL_1}{dt} = L_2 - L_1; \\ &X_1 = \frac{1/L_1}{\frac{M}{L_1}p+1}\left(L_2X_2 + L_1X_1 + VY_0 - VY_1\right); \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

$i = f$ (питающая тарелка)

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d}{dt}\left(MX_f\right) = L_{f+1}X_{f+1} - L_fX_f + VY_{f-1} - FX_f; \\ &X_f = \frac{1/X_f}{\frac{M}{L_f}p+1}\left(L_{f+1}X_{f+1} + VY_f - VY_{f-1} - FX_f\right); \\ &\tau\frac{dL_f}{dt} = L_{f+1} - L_f; \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

$i = n$ (верхняя тарелка)

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d}{dt}\left(MX_n\right) = L_{n+1}X_{n+1} - L_nX_n + VY_{n-1} - VY_n; \\ &X_n = \frac{1/L_n}{\frac{M}{L_n}p+1}\left(L_{n+1}X_{n+1} - VY_{n-1} - VY_n\right); \\ &\tau\frac{dL_n}{dt} = L_{n+1} - L_n. \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

(кипятильник)

$$\left.\begin{aligned} &d\left(MX_0\right) = L_1X_1 - L_0X_0 - VY_0; V = \frac{q}{\lambda}; \\ &X_0 = \frac{1/L_0}{\frac{M}{L_0}p+1}\left(L_1X_1 - VY_0\right). \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

В установившемся режиме уравнения элементов колонны для $1 \le i \le f$:

$$L_i = V + L_0,$$

$$X_i = \frac{1}{L_i}\left(VY_{i-1} + L_0X\right);$$

для $f < i \le n$

$$L_i = V + L_0X_0 - F,$$

$$X_i = \frac{1}{L_i}\left(VY_{i-1} + L_0X - FX_f\right).$$

В уравнениях при граничных условиях модели справедливы соотношения: $Y_0 = X_0$; $X_f = X_0$; $Y_{-1} = 0$; $F_0 = -L_0X_0$; $L_0 = 0$; $V_{-1} = 0$; $X_{fn+1} = X_{n+1}$; $X_{n+2} = 0$; $Y_{n+1} = 0$; $F_{n+1} = -D$; $L_{n+1} = V - D$; $L_{n+1} = 0$; $F_i = 0$ при $i \ne 0, f, n+1...$; $V_i = V$; $L_i = L_{i+1} + F$.

На рис. 2 представлена структурная модель процесса ректификации бинарной смеси, построенная на базе уравнений материального баланса (7)–(10).

При построении модели в уравнения баланса по легкому компоненту внесена величина расхода питающего раствора $\sum M_i = const$, умноженная на концентрацию. Величина кубового остатка L_0 показана как один из входов модели. В модель заложены соотношения парожидкостного равновесия при кипении (1), на которых основаны процессы ректификации.

Паровая фаза и жидкость, находящиеся в равновесии, имеют различные составы. Для любого компонента связь в мольных долях между содержанием его в паре Y_i и содержанием в жидкости X_i может быть получена для идеальных смесей упрощенным соотношением, основанным на законе Рауля:

$$P_0Y_i = X_if_i\left(T\right), \quad (11)$$

где P_0Y_i – парциальное давление i-го компонента в паровой фазе; $f_i\left(T\right)$ – функ-

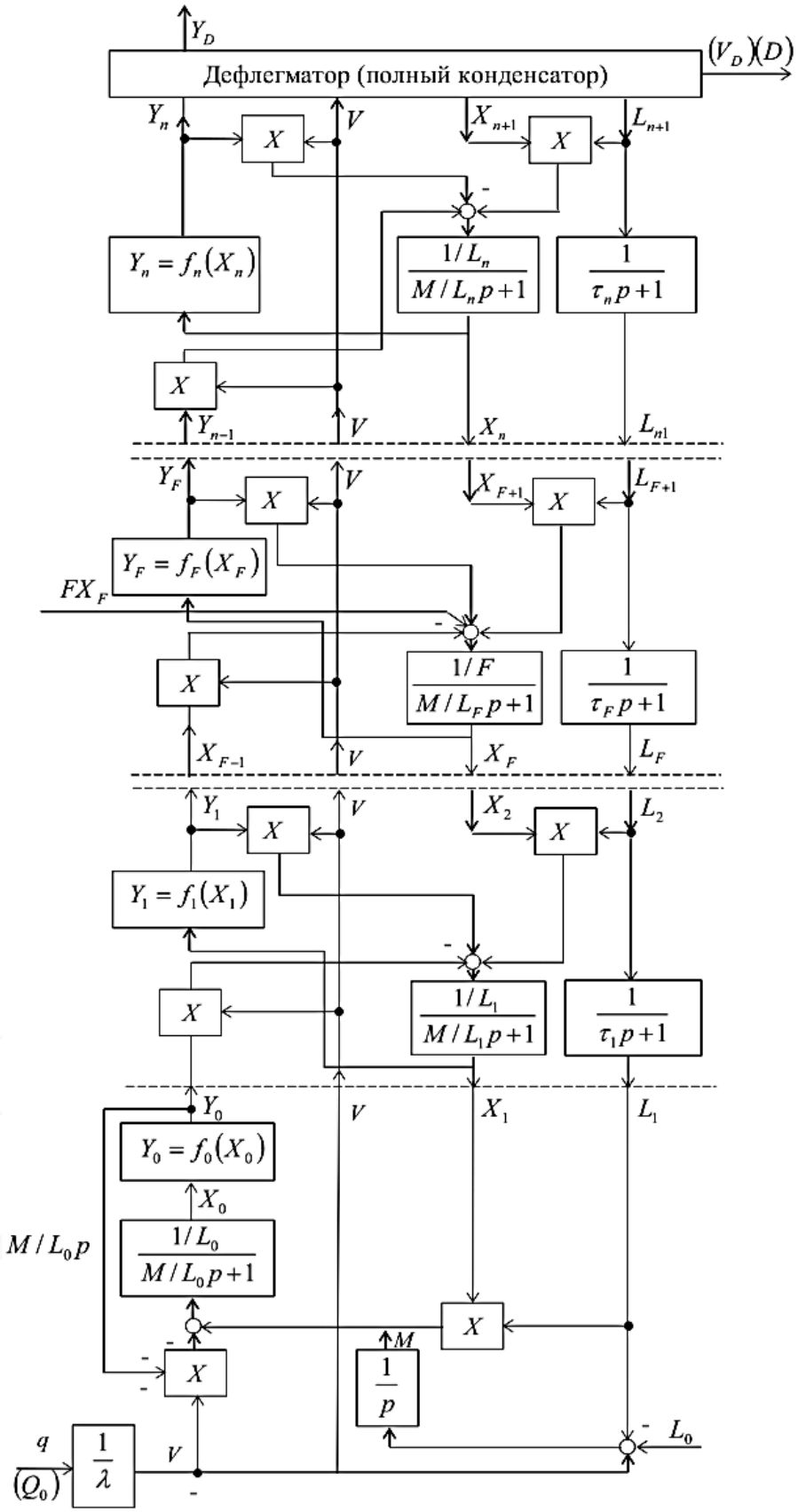


Рис. 2. Структурная модель процесса ректификации бинарной смеси
Fig. 2. Structural model of binary mixture rectification process

ция, выражающая связь между давлением и температурой кипения чистого i-го компонента; P_0 – общее давление в системе.

Предположенная структурная модель ректификационной колонны не рассматривает процессы конденсации или испарения в качестве основных актов разделения, представляя межфазный обмен как результат только передачи вещества за счет диффузии. При использовании структурного подхода возможно установление однозначного соотношения между тарелками реального аппарата и их представление в модели, учет гидродинамических условий на тарелках. В группу уравнений математической модели входят соотношения для расчета равновесных зависимостей между составами жидкой и паровой фаз (1), (11), соотношения которых можно также записать через константы равновесия:

$$Y_{i,k} = K_{k1}\left(T_i\right) X_{i,k}, \qquad (12)$$

где $K_{k1}\left(T_i\right)$ – константа равновесия как функция температуры и давления на *i*-ой ступени разделения.

Величины X_i и $Y_i\left(i = 0,1,...n\right)$ могут быть выражены как функции обобщенных координат, т.е.

$$X_i^* = X_i\left(F, X_f, V, D\right);$$
$$Y_i^* = Y_i\left(F, X_f, V, D\right). \qquad (13)$$

Область, в которой можно провести исследования, ограничена неравенствами, вытекающими из физического смысла переменных и особенностей процесса ректификации:

$0 < X < 1;\quad 0 < Y < 1;\quad 0 < F_{\min} \le F \le F_{\max};$
$0 < V_{\min} \le V \le V_{\max};\ 0 < D < F;\ 0 < L_0 < F.$

Поскольку непрерывный автоматический анализ состава фаз в колонне практически затруднен, то в качестве управляемой величины может быть принят косвенный параметр – температура жидкости или пара [14, 15]. В этом случае математическое описание процесса дополняется уравнениями связи между составом фаз и их температурой:

$$t_{V_i} = t_V\left(Y_i\right);\ t_{L_i} = t_L\left(X_i\right).$$

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью моделирования динамики процессов ректификации, используемых в металлургии для разделения и очистки бинарных жидкофазных смесей, является получение данных, необходимых для синтеза оптимальных управляющих систем. Исследуя путем моделирования закономерности протекания переходных процессов в колонне по основным каналам (при учете всех возмущающих и управляющих воздействий), можно выбирать, анализировать и синтезировать контуры управления, сравнить различные структурные схемы, отобрать регулирующую аппаратуру и оптимальные настройки регуляторов.

Предполагаемая структурная схема представляет собой наборную модель объекта, позволяющую на ее базе получать для конкретных типоразмеров его элементов общее решение с учетом нелинейных зависимостей в исследуемой системе.

Библиографический список

1. Фурман А.А. Неорганические хлориды (химия и технология). М.: Химия, 1980. 416 с.
2. Анисимов И.В. Основы автоматического управления технологическими процессами нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. М.: Химия, 1967. 408 с.
3. Ешенко А.А., Дунаев М.П., Гнатюк А.Н. Некоторые аспекты построения моделей процесса, протекающего в ректификационных колоннах // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием: в 2 т. (г. Иркутск, 21-25 апреля 2015 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. С. 81–87.
4. Loginov V., Matseyn N., Goryainov D. Development of technological processes using operational models // Aviamechanical engineering and transport. Series: Advances in Engineering Research: Proceedings of the

International Conference. 2018. Vol. 158. P. 264–266. [Электронный ресурс]. URL: https://www.atlantis-press.com/proceedings/avent-18/25901639 (17.02.2019). https://dx.doi.org/10.2991/avent-18.2018.50
5. Pashkevich V.M. Solution of optimization problems in mechanical engineering based on use of functional semantic networks // Aviamechanical engineering and transport. Series: Advances in Engineering Research: Proceedings of the International Conference. 2018. Vol. 158. P. 319–322. [Электронный ресурс]. URL: https://www.atlantis-press.com/proceedings/avent-18/25901650 (17.02.2019) https://dx.doi.org/10.2991/avent-18.2018.61
6. Буторин Д.В., Филиппенко Н.Г., Филатова Н.С., Лившиц А.В., Каргапольцев С.К. Автоматизация контроля структурных превращений в полимерных материалах при термической обработке // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1. С. 117–125.
7. Буторин Д.В., Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г. Автоматизация процесса контроля фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах // Информационные системы и технологии. 2017. № 1. С. 44–53.
8. Mukhopad Yu.F., Mariukhnenko V.F., Dunaev M.P., Skrypnik O.N., Sizykh V.N. Management of technical automation equipment of technological processes // Far East Journal of Electronics and Communications. 2017. Vol. 17. No. 5. P. 1021–1028. http://dx.doi.org/10.17654/EC017051021
9. Arsentiev O.V., Arsentiev G.O., Dunaev M.P. Research of energy characteristics of frequency-regulated electric drive // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series: 11th International Conference on mechanical engineering, automation and control systems (Tomsk, 4–6 December 2017). Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2017. Vol. 327. P. 1–8. https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052005
10. Mariyukhnenko V.S., Dudin S.A., Truskova T.V. System analysis of the human operator in an automated control system // Modern Technologies. System Analysis. Modeling. 2014. № 2. P. 143–150.
11. Pultyakov A.V., Dunaev M.P., Arsentiev G.O. Universal control method of auxiliary electric motors // Aviamechanical engineering and transport. Series: Advances in Engineering Research: Proceedings of the International Conference. 2018. Vol. 158. P. 109–113. [Электронный ресурс]. URL: https://www.atlantis-press.com/proceedings/avent-18/25901610 (25.02.2019) https://dx.doi.org/10.2991/avent-18.2018.21
12. Киргин Д.С., Дунаев М.П. Автоклав для вулканизации резиновых изделий // Повышение эффективности производства и использование энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 23–27 апреля 2009 г.) . Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. С. 84–87.
13. Лузин П.А., Дунаев М.П. Математическая модель тепловых процессов // Повышение эффективности производства и использование энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием: в 2 т. (г. Иркутск, 22–26 апреля 2014 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. С. 43–47.
14. Киргин Д.С., Дунаев М.П. Автоматизированное управление технологическим процессом вулканизации // Автоматизация и энергосбережение машиностроительных и металлургических производств: труды VII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Вологда, 11–15 марта 2012 г.). Вологда: Изд-во ВоГТУ, 2012. С. 178–182.
15. Goppe G.G., Dunaev M.P., Kirgin D.S. The automated technological complex on processing of rubber products // Symposium automated systems and technologies (St. Petersburg, 25–26 May 2015). St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2015. P. 33–42.

References

1. Furman AA. *Inorganic chlorides (chemistry and technology)*. Moscow: Himia; 1980. 416 p. (In Russ.)
2. Anisimov IV. *Fundamentals of technological process automatic control in petrochemical and oil refining industries*. Moscow: Himia; 1967. 408 p. (In Russ.)
3. Eshenko AA, Dunaev MP, Gnatiyk AN. Some aspects of building models of the process occurring in distillation columns. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of All-Russian scientific and practical conference with international participation. 21–25 April 2015, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2015, p. 81–88. (In Russ.)
4. Loginov V, Matseyn N, Goryainov D. Development of technological processes using operational models. In: Aviamechanical engineering and transport. Series: Advances in Engineering Research: Proceedings of the International Conference. 2018, vol. 158, p. 264–266. Available from: https://www.atlantis-press.com/proceedings/avent-18/25901639 [Accessed 17th February 2019]. https://dx.doi.org/10.2991/avent-18.2018.50
5. Pashkevich VM. Solution of optimization problems in mechanical engineering based on use of functional semantic networks. In: Aviamechanical engineering and transport. Series: Advances in Engineering Research: Proceedings of the International Conference. 2018, vol. 158, p. 319–322. Available from: https://www.atlantis-press.com/proceedings/avent-18/25901650 [Accessed 17th February 2019]. https://dx.doi.org/10.2991/avent-18.2018.61
6. Butorin DV, Filippenko NG, Filatova NS, Livshits AV, Kargopoltsev SK. Automation of control of structural transformation in polymeric materials at heat treatment. *Sovremenie tehnologii. Sistemnii analiz. Modelirovanie* = Modern technologies. System analysis. Modeling. 2016;1:117–125. (In Russ.)
7. Butorin DV, Livshits AV, Filippenko NG. Automation process control of phase and relaxation transformation

in polymer materials. *Informacionnie sistemi i tehnologii* = Information Systems and Technologies. 2017;1:44–53. (In Russ.)
8. Mukhopad YuF, Mariukhnenko VF, Dunaev MP, Skrypnik ON, Sizykh VN. Management of technical automation equipment of technological processes. Far East Journal of Electronics and Communications. 2017;17(5):1021–1028.
http://dx.doi.org/10.17654/EC017051021
9. Arsentiev OV, Arsentiev GO, Dunaev MP. Research of energy characteristics of frequency-regulated electric drive. In: Materials Science and Engineering: IOP Conference Series: 11th International Conference on mechanical engineering, automation and control systems. 4–6 December 2017, Tomsk. Tomsk: Institute of Physics Publishing; 2017, vol. 327, p. 1–8. https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052005
10. Mariyukhnenko VS, Dudin SA, Truskova TV. System analysis of the human operator in an automated control system. Modern Technologies. System Analysis. Modeling. 2014;2:143–150.
11. Pultyakov AV, Dunaev MP, Arsentiev GO. Universal control method of auxiliary electric motors. In: Aviamechanical engineering and transport. Series: Advances in Engineering Research: Proceedings of the International Conference. 2018, vol. 158, p. 109–113. Available from: https://www.atlantis-press.com/proceedings/avent-18/25901610 [Accessed 25th February 2019]. https://dx.doi.org/10.2991/avent-18.2018.21
12. Kirgin DS, Dunaev MP. Autoclave for rubber product vulcanization. In: *Povishenie effektivnosti proizvodstva I ispolzovania energii v usloviah Sibiri: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of All-Russian scientific and practical conference with international participation. 23–27 April 2009, Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2009, p. 84–87. (In Russ.)
13. Luzin PA, Dunaev MP. Mathematical model of thermal processes. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovanie energii v usloviyah Sibiri: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of All-Russian scientific and practical conference with international participation. 22–26 April 2014, Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2014, p. 43–47. (In Russ.)
14. Kirgin DS, Dunaev MP. Automated control of technological process of vulcanization. In: *Avtomatizaciya i energosberezhenie mashinostroitel'nyh i metallurgicheckih proizvodstv: trudy VII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii* = Automation and energy saving of machine-building and metallurgical industries: Proceedings of VII International scientific and technical conference 11–15 March 2012, Vologda. Vologda: Vologda State University; 2012, p. 178–182. (In Russ.)
15. Goppe GG, Dunaev MP, Kirgin DS. The automated technological complex on processing of rubber products. In: Symposium automated systems and technologies. 25–26 May 2015, St. Petersburg. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2015, p. 33–42.

Критерии авторства

Гнатюк А.Н., Дунаев М.П. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Gnatyuk A.N., Dunaev M.P. 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

Гнатюк Алексей Николаевич,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: xela@sibnet.ru

Дунаев Михаил Павлович,
доктор технических наук,
профессор кафедры электропривода и электрического транспорта,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: mdunaev10@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksey N. Gnatyuk,
Postgraduate student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: xela@sibnet.ru

Mikhail P. Dunaev,
Dr. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Electric Drive and Electric Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: mdunaev10@mail.ru

Обзорная статья / Review article
УДК 620.181.4, 666.3-135
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1212-1227

Развитие технологии инертных катодов. Часть 2. Электрохимический синтез диборида титана

© Е.С. Горланов
ООО «ЭКСПЕРТ-АЛ», Санкт-Петербург, Россия

Резюме: Целью статьи является исследование актуальных вопросов: определение уровня развития и текущего статуса технологии получения диборида титана методом электрохимического синтеза в расплавленных солях; придание импульса в развитии и проектировании алюминиевых электролизеров нового поколения с горизонтальными и вертикальными инертными электродами; широкое и критическое рассмотрение достижений мировых исследовательских центров в развитии технологии электрохимического синтеза диборида титана. Возобновившийся в 1990-х годах интерес к получению смачиваемых алюминием диборидтитановых покрытий на поверхности катода методом электроосаждения непосредственно в расплавленных солях продолжается до настоящего времени. Достигнуты определенные успехи в лабораторных условиях, но коммерческого выхода электрохимический синтез диборида титана не находит. Этот метод развивается как альтернатива дорогостоящей технологии изготовления компактных электродов, использование которых в разработке технологии дренированных катодов или вертикальных электродов замедляется не только по причине высокой стоимости материалов, но и технологическими особенностями специфических катодных процессов. Попытки длительного электролиза с применением этих технологий (электрохимического синтеза и компактных инертных электродов) заканчиваются нарушением смачиваемости катодов и периодического возникновения концентрационной поляризации, последствия которых выражаются в нестабильности электрохимических процессов и пассивации катода примесями и составляющими электролита. Основной причиной отсутствия прогресса в развитии электрохимического синтеза диборида титана и технологии электролиза с применением твердых катодов, т.е. технологии электролизеров нового поколения с горизонтальными и вертикальными инертными электродами, является объемная и поверхностная неоднородность поликристаллических катодов. Для решения этой проблемы предлагается использовать технологию микроборирования углеродной титансодержащей поверхности, индивидуальных диборидтитановых или композитных диборидтитано-углеграфитовых катодов, изготовленных с использованием технологии низкотемпературного синтеза диборида титана.

Ключевые слова: диборид титана, дренированный катод, смачиваемое покрытие, коррозия материалов, электрохимический синтез, микроборирование

Информация о статье: Дата поступления 22 октября 2019 г.; дата принятия к печати 19 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2019 г.

Для цитирования: Горланов Е.С. Развитие технологии инертных катодов. Часть 2. Электрохимический синтез диборида титана. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2019. Т. 23. № 6. С. 1212–1227. http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1212-1227

Development of inert cathode technology. Part 2. Electrochemical synthesis of titanium diboride

Evgeniy S. Gorlanov
«EXPERT-AL» LLC, St. Petersburg, Russia

Abstract: The purpose of the article is to study the following topical issues: determination of the development level and current status of the titanium diboride production technology by the method of electrochemical synthesis in molten salts; promotion of the development and designing of the new generation of aluminum electrolyzers with horizontal and vertical arrangement of inert electrodes; large-scale and critical review of the achievements of the world research centers in the development of the technology of electrochemical synthesis of titanium diboride. Resumed in the 1990s interest in obtaining aluminum wetting titanium diboride coatings on the cathode surface by the method of electrodeposition right in the molten salt is still continues. Some progress has been achieved in the laboratory conditions, however, the electrochemical synthesis of titanium diboride does not find any commercial use. This method is being developed as an alternative to the costly manufacturing technology of compact electrodes, the use of which in the development of drained cathode or

vertical electrode technology is hindered by the high cost of materials as well as by the technological features of specific cathode processes. Attempts to perform long-term electrolysis using these technologies (electrochemical synthesis and compact inert electrodes) usually result in failed wettability of the cathodes and periodic occurrence of concentration polarization. The latter lead to the instability of electrochemical processes and cathode passivation by impurities and electrolyte components. The main reason for the lack of progress in the development of electrochemical synthesis of titanium diboride and electrolysis technology using solid cathodes (the technology of new generation of electrolyzers with horizontal and vertical arrangement of inert electrodes) is the volume and surface inhomogeneity of polycrystalline cathodes. To solve this problem, it is proposed to use the microboriding technology for carbon titanium-containing surface, individual diboride titanium or composite diboride titanium carbon graphite cathodes produced using the technology of low-temperature synthesis of titanium diboride.

Keywords: titanium diboride, drained cathode, wettable coating, material corrosion, electrochemical synthesis, microboriding

Information about the article: Received October 22, 2019; accepted for publication November 19, 2019; available online December 28, 2019.

For Citation: Gorlanov ES. Development of inert cathode technology. Part 2. Electrochemical synthesis of titanium diboride**.** *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1212–1227. (In Russ.) http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1212-1227

1. ВВЕДЕНИЕ

Наряду с основными способами получения материалов различного функционального назначения (методы прямого синтеза, газофазный, карбо- и металлотермия и др.), широкие перспективы открываются при использовании высокотемпературного электрохимического синтеза (ВЭС). Высокотемпературным этот метод исторически называют в связи с его реализацией в расплавленных солях, температура плавления которых требует ведения электрохимических процессов при высоких температурах относительно электрохимических реакций в водных растворах.

Первые работы по электрохимическому синтезу TiB_2 были опубликованы в 1929–1948 гг. Эндрю [1–4]. Сообщается об осадках TiB_2 в виде порошка, полученных при электролизе из оксидных расплавов B_2O_3–TiO_2–MgO–MgF_2, B_2O_3–TiO_2–CaO–CaF_2, B_2O_3–TiO_2–Na_2O–NaF при 950–1000°C на графите и подложках Inconel. Однако, бориды тугоплавких металлов, синтезируемые в этих расплавах, были сильно загрязнены бором, карбидом бора и углеродом. Первое гладкое и с хорошей адгезией к подложкам Inconel покрытие TiB_2 было получено Д. Шлайном и его сотрудниками при 900°C из расплавов основного электролита $NaBO_2$ и $LiBO_2$ с добавками Na_2TiO_3, Li_2TiO_3 и TiO_2 [5].

В 1970-х гг. для осаждения боридов тугоплавких металлов стали использовать галоидные расплавы: фториды, хлориды или их смеси. Дж.М. Гомес для осаждения TiB_2 и ZrB_2-порошков при 900–1050°C использовал электролиз расплавов Na_3AlF_6–$NaCl$–$Na_2B_4O_7$–Na_2CO_3 с добавками TiO_2 или $ZrSiO_4$ при катодной плотности тока 0,1–2,4 А/см^2 и атомным соотношением бора к металлу 12–20 [6].

В 1980–90-х гг. появился повышенный интерес к возможности электроосаждения покрытий TiB_2 в алюминиевых электролизерах. М. Макита и его группа первыми исследовали синтез TiB_2 во фторидных расплавах LiF–KF и KF–KCl с добавками K_2TiF_6 и KBF_4 (как доноров Ti и B) при температурах выше 700–900°C [7–9].

Д.В. Тоусенд в 1991 г. опубликовал патент [10], в котором предлагалось проводить синтез боридов тугоплавких металлов на дренированном углеродном катоде путем введения в криолитовый расплав оксидных соединений, в частности TiO_2 и B_2O_3. Патент не получил коммерческого развития, но придал импульс систематическим исследованиям и попыткам создания боридных смачиваемых покрытий на углеродной поверхности.

С 1993 г. свои работы по синтезу боридов тугоплавких металлов из расплавленных солей в Университете Мишкольца (Венгрия) начали Д. Каптай и С.В. Девяткин Они первыми поставили перед собой задачу доказать возможность электроосажде-

ния TiB_2 из криолитовых расплавов на углеродной подложке [11]. Все работы проводились в лабораторных условиях.

Первая попытка осуществить процесс создания смачиваемого защитного покрытия (СЗП) непосредственно в процессе работы промышленного электролизера была предпринята в 2002–2003 гг. коллективом завода Ravenswood компании «Century Aluminum of West Virginia» под руководством Р. Келлер (создателя технологии). Работа по проекту проводилась в партнерстве с «EMEC Consultants, SGL Carbon, Century Aluminum of Kentucky» и «Golden Northwest Aluminum» при поддержке Министерства энергетики США. Идея заключалась в образовании слоя диборидов титана на поверхности углеродных блоков при взаимодействии растворенного в алюминии титана с борсодержащими соединениями, предварительно введенными на стадии производства в состав угольных блоков. Опробование этого способа в течение одиннадцати месяцев на промышленном электролизере на силу тока 93 кА и последующая аутопсия не обнаружили образование диборидного покрытия на поверхности блоков, содержащих около 23% масс. оксида бора [12].

Одновременно в России на Волгоградском алюминиевом заводе в 2003 г. на двух промышленных электролизерах с анодом Содерберга (на силу тока 160 кА) была предпринята попытка реализации разработанной ранее [13] технологии создания на угольной подине постоянно воспроизводимого СЗП из TiB_2, VB_2, CrB_2. В действительности, эта технология предполагала, что в расплавы электролита и алюминия принудительно и постоянно вводится только бор в виде его оксидов или солей. В качестве источника тяжелых металлов (Ti, V, Cr, Mn) использовалось только их примесное содержание в алюминии, привносимое с сырьем. После отключения и аутопсии одного из опытных электролизеров инструментальными методами факт присутствия на поверхности подины смачиваемого покрытия подтвердить не удалось. Зафиксированные косвенные признаки образования такого слоя также не были приняты в качестве удовлетворительного завершения испытаний технологии создания СЗП. Работа по этому способу на более высоком уровне продолжилась в 2016 г. на Казахстанском электролизном заводе (г. Павлодар) [14, 15].

Сегодня единой теории ВЭС не существует, тем не менее, применительно к электроосаждению тугоплавких боридов, его методы можно условно классифицировать следующим образом (рис. 1).

Для общего понимания направления подробное обсуждение ВЭС с привлечением электрохимической термодинамики осаждения бора из расплавов на различных поверхностях, электрохимическое оса-



Рис. 1. Классификация различных путей высокотемпературного электрохимического синтеза
Fig. 1. Classification of various methods of high temperature electrochemical synthesis

ждение бора и титана с последующим синтезом диборида титана, вольтамперометрические исследования синтеза TiB_2 в хлоридных и фторидных расплавах подробно рассмотрены в монографии [16]. Здесь акцентируется внимание на широко исследованных актуальных особенностях электрохимического синтеза диборида титана по одностадийному или ступенчатому режиму (**левая** ветвь на рис. 1). Но предпочтение отдается перспективному направлению электроосаждения бора на твердой поверхности катодов (**правая** ветвь на рис. 1).

2. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ДИБОРИДА ТИТАНА

В патенте 1991 г. Д.В. Тоусендом [10] предлагается создавать на поверхности углеродного катода смачиваемое алюминием защитное покрытие из боридов тугоплавких металлов (титана, циркония, гафния, хрома, ванадия, ниобия, тантала, молибдена, вольфрама) со скоростью 0,01 см/год. Предпочтение отдается диборидy титана. Необходимая концентрация компонентов в электролите: около 0,0025% масс. титана и около 0,0015% масс. бора. Процесс осуществляется в электролизере с дренированным катодом. Предполагалось производить постоянную подачу оксидов титана и бора (с сырьем или через аноды) в криолитоглиноземный расплав с последующим их растворением и электрохимическим восстановлением ионов на катодной алюминиевой поверхности до создания незначительного пересыщенного раствора титана и бора в тонком прикатодном слое алюминия.

В работе [17] подвергается сомнению утверждение Д.В. Тоусенда, что небольшие количества TiO_2 и B_2O_3 в электролите могут исключить коррозию катода за счет образования на поверхности угольной подины диборида титана. Скорость коррозии и состояние поверхности изучались в электролите с различным содержанием TiO_2 и B_2O_3. На рис. 2 представлен график зависимости скорости коррозии от содержания в электролите B и Ti (ppm = 10^{-4}% масс.). Во всех случаях добавки бора увеличивают коррозию предварительно незащищенной поверхности. В экспериментах образовывались только очень ограниченные количества диборида титана и всегда на межфазной границе металл-электролит или в электролите, но не на смачиваемой углеродной поверхности. Предполагается, что рост частичек TiB_2 происходил в сопровождении процесса восстановления растворенного в электролите алюминия по следующей реакции:

$$2B(III) + Ti(IV) + 10/3Al_{(раств.\ электрол.)} \rightarrow \rightarrow TiB_2 + 10/3Al(III).$$

Образцы разрезались и исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа, а также методами рентгенофотоэлектронной и атомно-эмиссионной спектроскопии. Наиболее важные моменты проиллюстрированы на рис. 3, где можно наблюдать, что между пленкой металла и

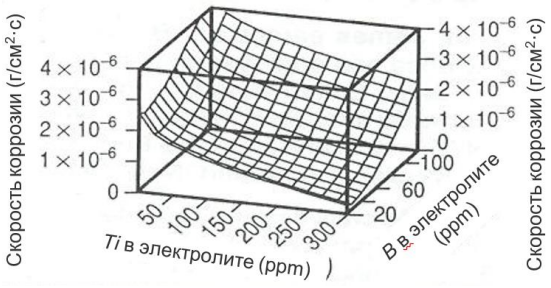


Рис. 2. Коррозия углеродного катода [17]
Fig. 2. Carbon cathode corrosion [17]



Рис. 3. Поперечное сечение электрода (углерод-электролит-металл) [17]
Fig. 3. Electrode cross section (carbon-electrolyte-metal) [17]

углеродной поверхностью находится прослойка электролита. Результаты исследований, тем не менее, ясно демонстрируют наличие феномена смачивания катодной поверхности из-за растворенного в электролите карбида. Этот растворенный карбид, по мнению авторов, должен иметь электронную проводимость, как только осаждение металла произойдет вне этой электролитной пленки.

Из вышесказанного следует, что патент Д.В. Тоусенда основан на химических принципах. Но очевидно, что массоперенос и химические условия на поверхности делают желаемые реакции в значительной степени маловероятными, что может служить объяснением, почему этого ранее не происходило.

Развитие и модификация патента Д.В. Тоусенда содержатся в патенте фирмы «Comalco» [18], в котором на поверхности наклонного дренированного катода предлагается создавать густой малоподвижный слой смеси боридных, карбидных, нитридных частиц тяжелых металлов с алюминием (суспензия между углеродной поверхностью и слоем алюминия, рис. 4).

Малоподвижность суспензии с пределом текучести 10–100 Н/м^2 и объемной плотностью 2,5 г/см^3 обеспечивается содержанием частиц в слое 25–70% об. и их размером в пределах 0,1–1 мкм или 5–500 мкм. В зависимости от размера частиц формируется слой от 1 до 10 мм. Предпочтительным составом пульпы считается смесь Al/TiB_2.

Предусмотрен вариант создания суспензии Al/TiB_2 при разрушении TiB_2/C слоя, если такой был предварительно создан и деградирует на поверхности подины. По нашему мнению, именно исследования дренированного электролизера после его работы в течение 8 мес. с предварительно созданным TiB_2/C-покрытием указало на существование смачиваемого слоя пульпы Al/TiB_2 на поверхности деградирующего композитного покрытия и послужило поводом к предлагаемому способу. Сообщается, что применение способа может быть распространено и на обычные индустриальные электролизеры с большим слоем алюминия на поверхности катода.

В работе [19] проводили электроосаждение покрытий TiB_2 из расплавов Na_3AlF_6–K_2TiF_6–KBF_4 и Na_3AlF_6–B_2O_3–TiO_2. Электролиз выполнялся при катодной плотности тока 0,25–1 А/см^2 при 960°С в течение 30 мин. Во всех случаях только порошок TiB_2 был идентифицирован на катоде после электролиза во всем интервале концентраций для обоих электрохимически активных компонентов.

Диборидтитановые покрытия низкого качества в электролите $78Na_3AlF_6$ + $20B_2O_3$ + $2TiO_2$ (% мол.) были получены при

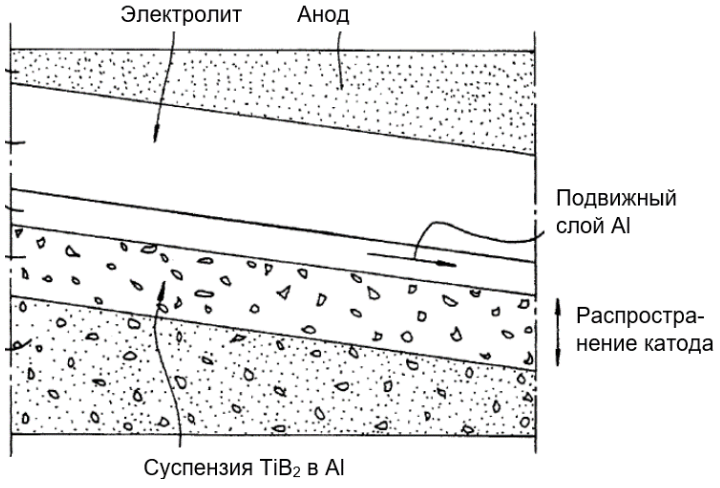


Рис. 4. Схема присутствия суспензии Al/TiB_2 на катоде [18]
Fig. 4. Diagram of Al/TiB_2 suspension presence on cathode [18]

катодных плотностях тока от 0,25 до 0,50 А/см^2. На рис. 5 представлена микрофотография поперечного сечения молибденового катода с покрытием, полученным при 970°С, 0,4 А/см^2 за 20 мин. Покрытие было неоднородным и некогерентным с толщиной около 7 мкм. Неоднородность покрытий не позволяла определить скорость осаждения в зависимости от плотности тока. При плотности тока около 0,5 А/см^2 только порошок диборида титана был электроосажден на катоде.

Вероятно, авторами [19] были предприняты исчерпывающие попытки получить компактные покрытия TiB_2 с хорошей когезией на металлических подложках. Отрицательные результаты были расценены как невозможность высокотемпературного электроосаждения диборидных покрытий из криолитовых расплавов.

С этим выводом не соглашались С.В. Девяткин и Д. Каптай с коллегами, которые с 1993 г. предприняли серию исследований и экспериментов для реализации привлекательного способа создания смачиваемых покрытий непосредственно в алюминиевом электролизере.

Результаты первой попытки, после термодинамических расчетов и вольтамперометрических исследований, были опубликованы в 1994 г. [11]. Эксперименты электролиза были выполнены в графитовых тиглях в расплаве Na_3AlF_6 – $Al_2O_{3(насып.)}$ –$TiO_{2(насыщ.)}$ – B_2O_3 (5% масс.) при 1273 К и атмосфере воздуха. Применялись катоды из графита, Mo и Nb. Авторы утверждают, что по рентгенографическим пикам можно говорить о синтезе некоторого количества TiB_2. Но не указывается, в каком виде.

В работе С.В. Девяткина и Д. Каптай (1997 г.) эксперименты по электрохимическому синтезу покрытий выполнялись с использованием комплексной добавки бора в графитовых тиглях при 1273 К на воздухе или в атмосфере аргона [20]. Сначала оксиды бора и алюминия были смешаны и подогреты. После этого комплексный оксид был смешан с оксидом титана и криолитом, и вся система расплавлялась. Провод вольфрама с диаметром 3 мм использовался для катода. Покрытие диборида титана толщиной 10 мкм было получено на вольфраме в расплаве Na_3AlF_6 – $Al_4B_2O_9$ (4% масс.) – TiO_2 (2% масс.) при плотностях тока 0,4 А/см^2 и времени 100 мин (рис. 6). При высоких плотностях тока получался порошок диборида титана, смешанный с расплавом, криолит невозможно отделить от диборида, т.к. он плохо растворим в щелочах и кислотах.

Эксперименты [21] по созданию диборидного покрытия в процессе электролиза были выполнены на катодах из стеклоуглерода при низких плотностях тока (ниже 50 мА/см^2) и 1273 К в системе Na_3AlF_6 + Al_2O_3 (1,1% масс.) + $CaTiO_3$ (3% масс.) + $B_2O_3{\cdot}Al_2O_3$ (5% масс.). После электролиза существование тонкого слоя TiB_2 доказано на катодной поверхности рентгенофазовым анализом (РФА) и методом дисперсионной рентгеновской спектроскопии по длине волны. Микрография поперечного сечения углеродистого катода с TiB_2-покрытием показана на рис. 7.

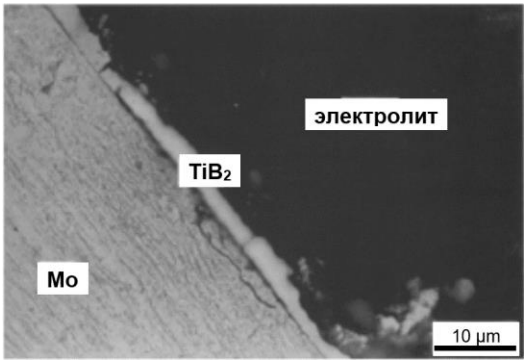


Рис. 5. Поперечное сечение TiB_2 покрытого молибденом катода [19]
Fig. 5. Cross section of TiB_2 of a molybdenum coated cathode [19]

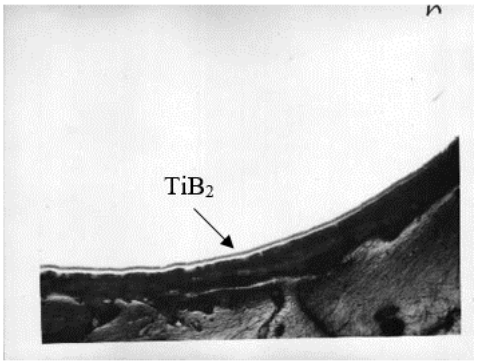


Рис. 6. Слой TiB_2 на вольфраме ∅3 мм (×100) [20]
Fig. 6. TiB_2 layer on tungsten ∅3 mm (×100) [20]

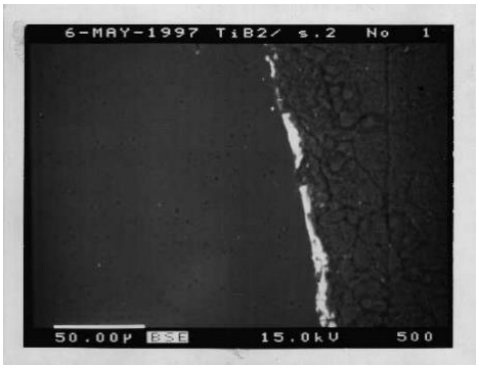


Рис. 7. Слой TiB_2 на стеклоуглероде [21]
Fig. 7. TiB_2 layer on glass carbon [21]

Таким образом, по мнению авторов, была продемонстрирована возможность произвести TiB_2-покрытие на углеродистых катодах непосредственно в классических электролизерах Эру-Холла, так называемой технологией электрохимического синтеза из расплава криолита. Заметим, что TiB_2-покрытие на стеклоуглероде получено при плотности тока менее 0,05 А/см^2, не является сплошным и не отличается хорошей сцепляемостью с подложкой.

В работах [22–23] эксперименты электролиза были выполнены при 1020°С в расплавленной Na_3AlF_6–$Al_4B_2O_9$–$CaTiO_3$ системе. Графит, стеклоуглерод, Ni и W использовались как материалы катода. Диборидтитановые плотные (когерентные) покрытия были получены на электроде пластин никеля, стеклоуглерода и проводах из W из системы Na_3AlF_6 – $Al_4B_2O_9$ (4% масс.) – $CaTiO_3$ (2% масс.) при 1000–1020°С и плотности тока 0,2–0,6 А/см^2 в течение 3–5 ч.

Толщина осажденного слоя TiB_2 составила 15–20 мкм (скорость осаждения – 50 мкм/ч). Выход по току изменялся в пределах 60–70%, потери связаны с тем, что катодный осадок был хорошо сцеплен с криолитом. Поперечное сечение закаленной системы криолит-графит представлено на рис. 8, 9 – результаты сканирующей электронной микроскопии (SEM) (от англ. «scanning electron microscopy»).

На плоской поверхности углеродных материалов покрытие диборида титана разрушается (рис. 10) из-за внутренних напряжений, возникающих при охлаждении за счет большой разницы коэффициентов термического расширения.

На основании результатов экспериментов Д. Каптай и С.В. Девяткин [22] делают вывод о возможности синтеза покрытия диборида титана из системы Na_3AlF_6–$Al_4B_2O_9$–$CaTiO_3$. Но и в данном случае ни

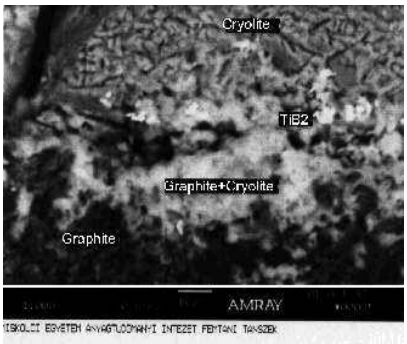


Рис. 8. SEM микрофотография поперечного сечения тигля после электролиза
Fig. 8. SEM micrograph of the crucible cross section after electrolysis

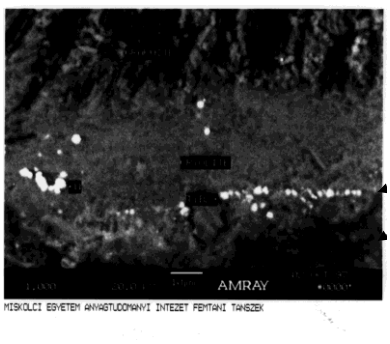


Рис. 9. Шлиф поперечного сечения графитового тигля после электролиза
Fig. 9. Sectional cross section of the graphite crucible after electrolysis

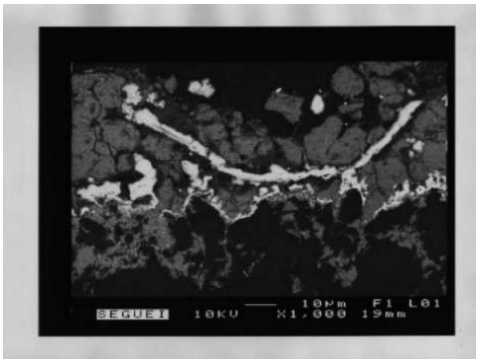


Рис. 10. Разлом покрытия TiB_2 на графите при охлаждении образца
Fig. 10. Fracture of TiB_2 coating on graphite at sample cooling

на одной из фотографий (см. рис. 7, 8) не обнаруживается плотный сплошной слой TiB_2 на графитовой подложке. Напротив, на рис. 10 представлен фрагментарный разрушенный слой, не контактирующий с углеродной подложкой.

Причин такого результата еще на стадии лабораторных исследований несколько. Например, наличие примесей в электролите обычно означает их соосаждение на кристаллах целевого покрытия, вызывая блокировку роста отдельных граней и формирование порошковой и дендритной морфологии осадков. К причинам растрескивания и деградации покрытия можно отнести относительно высокие скорости роста синтезируемых соединений с возникновением значительных сжимающих напряжений внутри слоя. Следует также учитывать изначальные или созданные при электролизе различия в коэффициентах термического линейного расширения (КТЛР) синтезируемого слоя и углеграфитового основания, инициирующих отслаивание покрытия на локальных участках катода.

С учетом этих факторов была осуществлена серия лабораторных исследований по методу последовательного электроосаждения титана, бора и алюминия на углеродной поверхности [24]. В основе исходных компонентов расплава использовались криолит с криолитовым отношением (к.о.) равным 1,78 или фториды натрия и алюминия химической чистоты. В качестве добавок применялись глинозем, оксид титана и борсодержащие компоненты химической чистоты в количестве 3–5% масс. Все эксперименты проводились в электролите с к.о.=2,5 при 970±5°С и плотности тока 0,7–0,8 А/см^2 в течение 24 ч. Последовательно восстанавливая на катоде титан, бор и алюминий, на его поверхности обнаруживали слой металлического алюминия (рис. 11).

Методами РФА проб с поверхности катодов определялось небольшое количество соединений Ti–B–C, в т.ч. TiC и TiB_2, ответственных за эффект смачивания. Но при ближайшем рассмотрении под электронным микроскопом методами SEM и

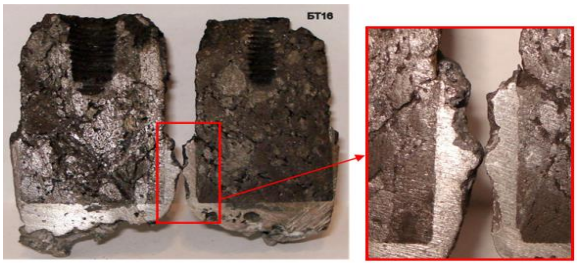


Рис. 11. Вид катода после эксперимента
Fig. 11. Cathode view after the experiment

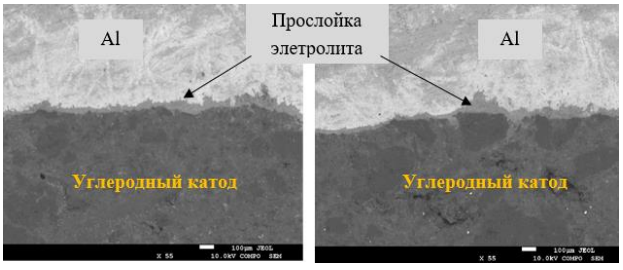


Рис. 12. SEM микрофотография межфазной границы алюминий-катод
Fig. 12. SEM micrograph of the aluminum cathode interface

энергодисперсионного микроанализа (EDS) (от англ. «energy dispersive scanning») между слоем алюминия и катодной поверхностью во всех случаях обнаруживалась прослойка электролита (рис. 12). Этот эффект визуального присутствия алюминия на катоде с признаками пассивации поверхности слоем электролита назван «псевдосмачиваемостью». Таким образом, и эта попытка создания на поверхности TiB_2 покрытия на углеродном катоде также не может быть признана удовлетворительной и приемлемой для распространения в коммерческом масштабе.

Эти особенности и результаты электрохимического синтеза диборида титана на катоде, по-видимому, находили отражение в 5-летних попытках компании «Northwest Aluminum Technologies (NAT)» осуществления длительного электролиза в лабораторных ячейках на силу тока 10–300 А и полупромышленных электролизерах на силу тока 5 кА с вертикальными электродами по заданию Министерства энергетики США [25].

В качестве малорасходуемого анода использовались пластины из сплава Cu–Ni–Fe, для катода применялись сплошные или полые горячепрессованные изделия из TiB_2 (рис. 13). Электроды погружались в низкоплавкий электролит с междуполюсным расстоянием (МПР) между ними 1,27 см и проведением электролиза при плотностях тока от 0,25 до 1 А/см^2 в течение 5–300 ч. Отмечались следующие проблемы, которые исследователями последовательно решались:

– расслоение и растрескивание TiB_2-катодов;

– коррозия анодов на границе воздух–электролит;

– образование корочки электролита на поверхности жидкого алюминия;

– подъем слоя алюминия по катоду вверх на границу воздух–электролит и его окисление.

Но с приближением плотности тока к промышленным значениям поверхность TiB_2-катодов пассивировалась электролитной корочкой, возникали катодные осадки в ячейках любой мощности. Было сделано предположение, что свойство смачивания алюминием в значительной степени зависит от примесного состава горячепрессованных пластин TiB_2. В итоге авторы [25] делают однозначный вывод – горячепрессованные катоды из диборида титана не пригодны для коммерческого использования. Постскриптум доктора Д.Р. Брэдфорда, автора отчета NAT, заключает: «Таким образом, наиболее важным условием разработки считается создание катодов, пригодных для длительного использования в технологии низкотемпературного электролитического инертного анода».

Похожие результаты представлены в 2018 г. в крупномасштабных лабораторных исследованиях особенностей электролиза в ячейке с вертикальными электродами [26]. В качестве анодов использованы

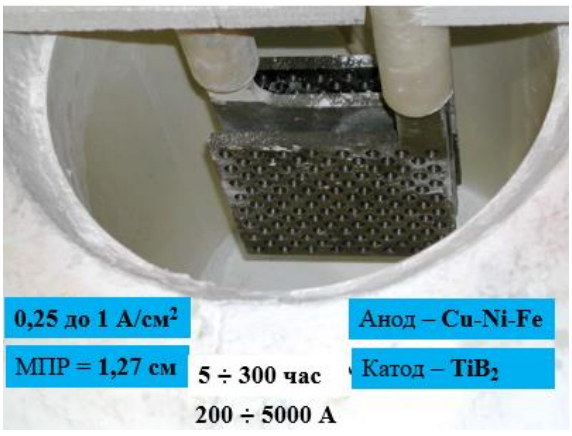


Рис. 13. Схема электролизной ячейки с вертикальным расположением электродов [25]
Fig. 13. Electrolytic cell diagram with the vertical arrangement of electrodes [25]

«инертные» керамические материалы, катоды изготавливали из композита TiB_2–C. Для расплавленной среды готовился низкоплавкий электролит KF–NaF–AlF_3 смешиванием соответствующих количеств натриевого криолита, фторида калия, фторида алюминия и глинозема промышленных сортов. После расплавления смеси содержание KF составляло около 20% масс., соотношение ([NaF] + [KF])/[AlF_3] составляло 1,4–1,5, а содержание глинозема – 4,2–5,3% масс.

В экспериментах с плотностью тока 0,07 А/см^2 на катоде алюминий отсутствовал (рис. 14 *a*).

В опытах с плотностью тока в диапазоне 0,15–0,26 А/см^2 все параметры электролиза поддерживались стабильными, на смачиваемой поверхности формировался плотный слой алюминия (рис. 14 *b*).

Ситуация менялась при повышении плотности тока выше 0,4 А/см^2, процесс электролиза дестабилизировался, выход по току резко уменьшался. На (рис. 15) для сравнения представлены поперечные сечения катодов после проведения процесса электролиза при различных плотностях тока.

На катоде в эксперименте с 0,31 А/см^2 формируется слой алюминия, визуально плотно прилегающий к катодной поверхности (рис. 15 *a*). На катоде, проработавшем с приближенной к промышленным значениям плотностью тока, формируется слой из составляющих электролита и карбида алюминия (рис. 15 *b*). Авторы [26] справедливо объясняют эту ситуацию локальным повышением криолитового отношения в приэлектродном пространстве с увеличением поляризации катода, при котором интенсифицируется разряд ионов натрия и калия.

Но эти натрий и калий в атомарном виде могут взаимодействовать с материалом катода с микродеградацией поверхности. Подтверждением тому являются результаты исследования [27], в котором изу-

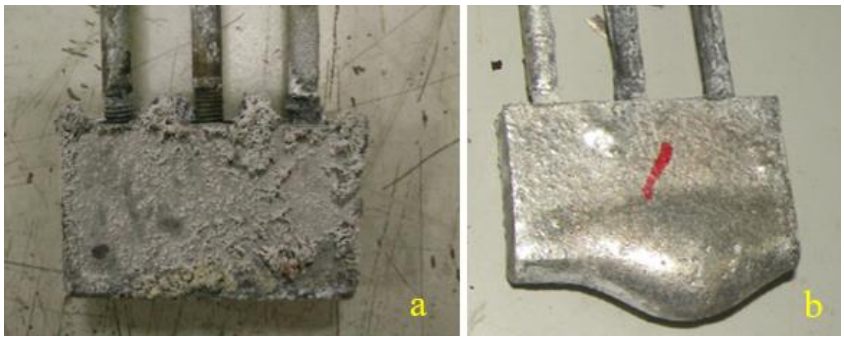


Рис. 14. Катоды TiB_2-C после электролиза при 0,07 А/см^2 (a) и при 0,15–0,26 А/см^2 (b) [26]
Fig. 14. TiB_2-C cathodes after electrolysis at 0.07 A/cm^2 (a) and at 0.15–0.26 A/cm^2 (b) [26]



Рис. 15. Поперечное сечение катодов TiB_2-C после электролиза при 0,31 А/см^2 (a) и 0,65 А/см^2 (b) [26]
Fig. 15. Cross section of TiB_2-C cathodes after electrolysis at 0.31 A/cm^2 (a) and 0.65 A/cm^2 (b) [26]

чалось взаимодействие натрия с горячепрессованными цилиндрическими образцами TiB_2 в установке термогравиметрического анализа. Исследуемый материал – TiB_2 – показал высокую реакционную способность по отношению к газообразному Na. Увеличение веса после 72 ч воздействия паров натрия составило 0,26 и 0,43% масс. при 750 и 850°C, соответственно. В то же время визуально образец не имел явных изменений размеров, но изменил цвет (рис. 16).

Поверхностный слой толщиной 30–40 мкм по данным EDS-анализа состоит в основном из Ti, Na и O (рис. 17). Причем плотной фазой на поверхности диборида титана является борат натрия с формулой $NaBO_2$, а верхняя пористая фаза состоит из оксидов натрия и титана. Это означает, что натрий и кислород вступают в реакцию с участием TiB_2. По мнению авторов, этот процесс в условиях экспериментов (750°C) происходит по следующей схеме:

$$TiB_2 + 8Na(г) + 4.5O_2(г) \rightarrow Na_4TiO_4 + Na_4B_2O_5(ж). \quad (1)$$
$$\Delta G^0_T = -3528{,}4 \text{ кДж/моль}$$

На основании полученных результатов авторы [27] обращают внимание, что в промышленном электролизере образовавшиеся жидкие боратные фазы будут растворяться в электролите и подвергать новую поверхность воздействию следующего цикла разложения. Это приведет к непрерывной деградации катода. И если бы последствия ограничивались только коррозией катода, которая может быть приемлемой для коммерческого использования электродов на основе диборида титана, развитие технологии инертных катодов можно было бы считать успешным.

Но проблема поверхностной коррозии, увеличение физической и химической неоднородности катода могут быть серьезным препятствием для обеспечения нормального процесса электролиза. Более того, в работе [28] именно поверхностной микродефектностью поликристаллических катодов предлагается объяснять многолетнее отсутствие прогресса коммерческого развития технологии электролиза криолитоглиноземных расплавов с применением инертных электродов. На основании численных исследований и экспериментальных данных утверждается, что поликристаллическая структура, химическая и физическая неоднородность поверхности катодов являются причиной нарушения смачиваемости и периодического возникновения концентрационной поляризации, последствия которых выражаются в нестабильности электрохимических процессов и пассивации катода примесями и составляющими электролита. В результате процесс электролиза требует экстренного вмешательства, процедур очистки поверхности катодов или полной остановки.

Логичным условием применения твердых катодов является организация процессов электролиза с непрерывным восстановлением поверхности, уменьше-

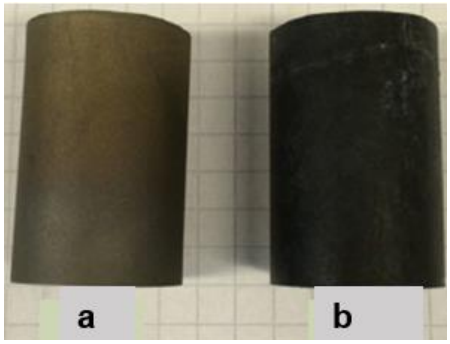


Рис. 16. Внешний вид образца TiB_2 до (a) и после (b) испытаний в газообразном Na при 750°C [27]
Fig. 16. External view of a TiB_2 sample before (a) and after (b) testing in gaseous Na at 750°C [27]

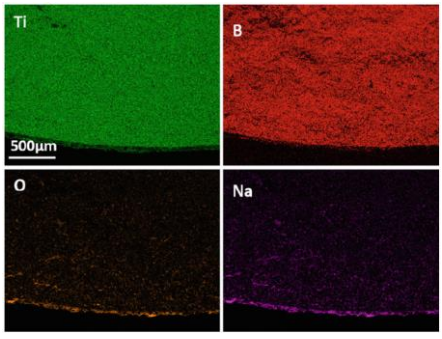


Рис. 17. EDS-картирование поперечного сечения образца TiB_2 после испытаний [27]
Fig. 17. EDS mapping of the TiB_2 sample cross section after testing [27]

нием ее химической неоднородности и микродефектности. Предложено использовать технологию микроборирования углеродной титансодержащей поверхности [29, 30], индивидуальных TiB_2 или композитных диборидтитано–углеграфитовых (TiB_2–CG) катодов [28], изготовленных с использованием технологии низкотемпературного синтеза диборида титана [31, 32]. В первом случае организуется электрохимическое формирование смачиваемого алюминием сплошного, прочного, постоянно воспроизводимого Ti–B–C или TiB_2-слоя на поверхности углеродного катода, содержащего титан или его соединения (рис. 18):

$$2B + TiO_2 + 2C \rightarrow TiB_2 + 2CO, \quad \Delta G_{1300K} = -67{,}0 \text{ кДж/моль} \qquad (2)$$

$$B_2O_3 + Ti + 3C \rightarrow TiB_2 + 3CO. \quad \Delta G_{1300K} = -41{,}0 \text{ кДж/моль} \qquad (3)$$

Микроборирование катода и организация электрохимических реакций на поверхности восстанавливают ее качество, уменьшают химическую неоднородность и микродефектность в течение всего периода электролиза. Поэтому технология борирования титансодержащих катодов исключает возникновение эффекта пассивации катода.

Для катодов на основе диборида титана технология электролиза криолитоглиноземных расплавов должна сопровождаться микродозированием бора в электролит, восстановлением его на катоде с последующим взаимодействием на поверхности и в объеме электрода с примесными компонентами [31]:

$$2B + Ti = TiB_2, \ \Delta G^0_{1300} = -320 \text{ кДж/моль} \qquad (4)$$

$$3B + TiBO_3 = TiB_2 + B_2O_3, \quad \Delta G^0_{1300} = -228 \text{ кДж/моль} \qquad (5)$$

$$4B + TiO_2 = TiB_2 + B_2O_2\uparrow, \ \Delta G^0_{1300} = -119 \text{ кДж/моль} \qquad (6)$$

$$2B + TiC_{0,5}O_{0,5} \rightarrow TiB_2 + 1/2CO. \quad \Delta G^0_{1300} = -81 \text{ кДж/моль} \qquad (7)$$

Эти процессы будут не только восстанавливать исходный состав катода, но и устранять микродефектность его поверхности. Генерация и восстановление смачиваемого слоя не зависят от качества поверхности, на которой оно создается.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электрохимические методы создания покрытий наиболее целесообразны на изделиях, которые используются в чрезвычайно агрессивных условиях процессов электролиза расплавленных солей. Такие попытки наиболее часто предпринимались на образцах углеграфитовых изделий с перспективой их распространения на углеродные катодные блоки в промышленных условиях электролиза криолитоглиноземных расплавов. При наличии защитного, смачиваемого алюминием покрытия, на поверхности катода открывается возможность

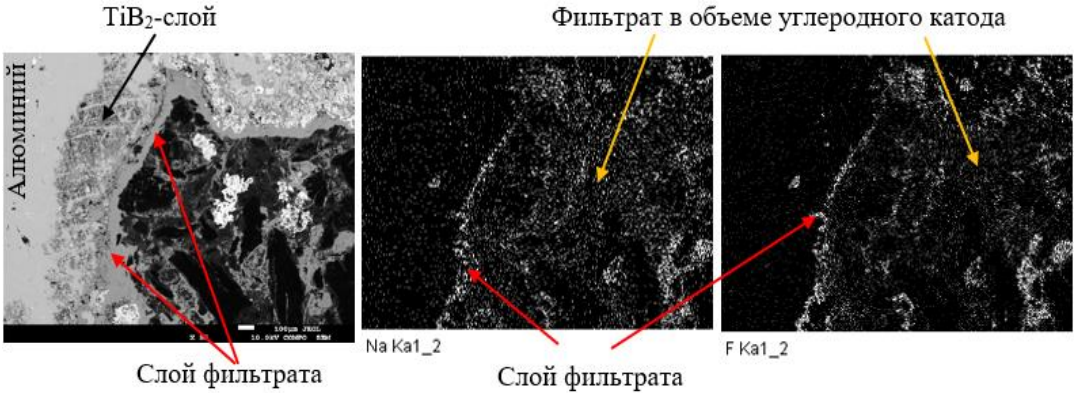


Рис. 18. Смачиваемый алюминием TiB_2-слой и распределение фильтрата в теле катода [30]
Fig. 18. Aluminum-wettable TiB_2 layer and filtrate distribution in the cathode body [30]

приблизиться к теоретически возможному расходу электроэнергии на получение 1 кг алюминия – 6,3 кВт·ч.

1. Высокотемпературный электрохимический синтез покрытий из тугоплавких соединений на катодных поверхностях активно развивается с начала 1990-х годов. В основном применяются хлоридно-фторидные (NaCl–KCl, KF–KCl, LiF–KCl, KF–LiF–NaF) и криолитовые ($NaF–AlF_3$, $Na_3AlF_6–Al_2O_3$) системы расплавов с добавками электроактивных компонентов TiO_2, B_2O_3, $Al_4B_2O_9$, $CaTiO_3$, K_2TiF_6, KBF_4, $Na_2B_4O_7$:

– из хлоридно-фторидных систем расплавов при плотностях тока до 0,5 А/см^2 удается получать плотные TiB_2-покрытия с удовлетворительной адгезией к металлической или углеродной подложке;

– из криолитовых систем расплавов при плотностях тока выше 0,1 А/см^2 получить плотные когерентные TiB_2-покрытия на инертных и реактивных катодах не удалось, были синтезированы порошки или их бесформенный неплотный конгломерат в приэлектродной поверхности.

2. Вероятные причины отсутствия прогресса в развитии ВЭС:

– стремление и необходимость получения покрытий боридов тугоплавких соединений при близких к промышленным плотностях тока (выше 0,5 А/см^2) создает условия работы в области предельной плотности тока синтеза, при которой катодный процесс управляется переносом ионов к катоду. При высоких скоростях процесса в прикатодной поверхности создается дефицит электроактивных компонентов (Ti^{4+} и B^{3+}). Вследствие этого получает развитие рост уже осажденных и синтезированных кристаллов TiB_2, приводя к производству дендритов или порошков, образованию порошков и дендритной структуры осадков способствует дефицит в электролите одного из компонентов синтезируемых покрытий, спровоцированный их активным взаимодействием с компонентами расплава до образования газообразных продуктов типа BF_3, TiF_4, особенно это касается бора, потери которого могут достигать 40%;

– наличие примесей в электролитах лабораторных ячеек и промышленных ванн может стать причиной их соосаждения на кристаллах покрытия, вызывая блокировку роста отдельных граней и формирование порошковой и дендритной морфологии осадков;

– относительно высокие скорости роста синтезируемых соединений вызывают значительные сжимающие напряжения внутри слоя (более 3 ГПа), которые могут стать причиной растрескивания и деградации покрытия;

– изначальные или созданные в процессе работы электролизера различия в КТЛР синтезируемого слоя и углеграфитового основания могут стать причиной отслаивания покрытия на локальных участках подины;

– поликристаллическая структура (поры и межзеренное пространство), химическая и физическая неоднородность поверхности катодов являются причиной нарушения смачиваемости и периодического возникновения концентрационной поляризации, последствия которых выражаются в нестабильности электрохимических процессов и пассивации катода примесями и составляющими электролита.

Ни одним из мировых алюминиевых производителей и научно-исследовательских центров эти вопросы пока еще не решены полностью и окончательно.

3. Перспективным направлением разработки смачиваемых катодов следует считать универсальную технологию микроборирования:

– углеродной титансодержащей катодной поверхности (предпочтительное применение данной технологии для действующих электролизеров);

– поверхности TiB_2-катодов монокомпозитных или композитных TiB_2–CG.

Данная технология может использоваться при разработке и проектировании электролизеров нового поколения с дренированным катодом или вертикальными электродами.

Библиографический список

1. Andrieux L. Recherches Sur L' Electrolyse des Oxydes Metalliques Dissous Dans L'Anhydride Borique Ou Dans Les Borates Fondus // Ann. Chimie. 1929. Vol. 12. P. 423–507.
2. Andrieux L. Sur la preparation et les proprietes des borures de tantale et de columbium // Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de L' Academie des Sciences. 1929. Vol. 12. P. 1279–1281
3. Acad C.R., Andrieux L. Barletty Synthesis of Refractory Metals Borides from Melts // Sci. 1932. Vol. 194. No. 12. P. 1573.
4. Andrieux J.L., Weiss G. Mémoires présentés a la société chimique // Bulletin de la Société Chimique de France. 1948. Vol. 15. P. 598.
5. Schlain D., McCawley F.X., Wyche C.J. Electrodeposition of titanium diboride coatings // Journal of Electrochemical Society. 1969. Vol. 116. Issue 9. P. 1227–1228. https://doi.org/10.1149/1.2412284
6. Patent no. 3775271, The United States of America, Cl. C22d 3/20. Electrolytic Preparation of Titanium and Zirconium Diborides Using a Molten, Sodium Salt Electrolyte / J.M. Gomes, K. Uchida; The United States of America. No. 316217. Filed 18.12.1972; published 27.11.1973.
7. Makyta M., Matiašovský K., Fellner P. Mechanism of the cathode process in the electrolytic boriding in molten salts // Electrochimica Acta. 1984. Vol. 29. Issue 12. P. 1653–1657. https://doi.org/10.1016/0013-4686(84)89006-4
8. Makyta M., Grjothheim K., Matiasovsky K. Electrodeposition of TiB_2 Powders and Coatings // VI Aluminium Simposium (Banska Bystrica, 12–17 August 1988). Banska Bystrica, 1988. P. 107–114.
9. Makyta M., Danek V., Haarberg G.M., Thonstad J. Electrodeposition of titanium diboride from fused salts // Journal of Applied Electrochemistry. 1996. Vol. 26. Issue 3. P. 319–324.
10. Patent no. 5028301, The United States of America, Cl.[5] C25D 3/66, C25C 3/06, B05D 5/12. Supersaturation plating of aluminum wettable cathode coatings during aluminum smelting in drained cathode cells / D.W. Townsend. No. 294781. Filed 09.01.1989; published 02.06.1991.
11. Deviatkin S.V., Kaptay G., Berecz E. High-Temperature Electrochemical Synthesis of TiB_2 from Cryolite-Alumina Melts Containing Oxides of Boron and Titanium // Proceeding of the Ninth International Symposium on Molten Salts. (San Francisco, 22 May 1994). San Francisco: The Electrochemical Society Inc. 1994. Vol. 94. No. 13. P. 548–557.
12. McClung M., Browning J., Carte S., Lightle C., Love R.O., Zerkle R. Plant Experience with an Experimental Titanium Diboride Cell // Light Metals. 2004. P. 399–404.
13. Горланов Е.С., Никифоров С.А. Альтернативная технология создания смачиваемого защитного покрытия на поверхности углеграфитовой подины алюминиевого электролизера // Алюминий Сибири: сб. докл. XII Междунар. конф. (г. Красноярск, 15–18 сентября 2006 г.). Красноярск, 2006. С. 91–95.
14. Gorlanov E.S., Batrachenko A.A., Smailov B.Sh.-A., Skvortsov A.P. Testing Baked Anodes with an Increased Vanadium Content // Metallurgist. 2018. Vol. 62. Issue 1–2. P. 62–69. https://doi.org/10.1007/s11015-018-0626-x
15. Gorlanov E.S., Batrachenko A.A., Smailov B.Sh.-A., Morozov A.Yu. Role of Vanadium in Aluminum Electrolyzer Melts // Metallurgist. 2019. Vol 62. Issue 9–10. P. 1048–1053. https://doi.org/10.1007/s11015-019-00752-8
16. Горланов Е.С., Бажин В.Ю. Диборид титана для алюминиевых электролизеров. Обзор. СПб.: Политех-пресс, 2019. 439 с.
17. James B.J., Welch B.J., Hyland M.M., Metson J.B., Morrison C.D. Interfacial Processes and the Performance of Cathode Linings in Aluminum Smelters // JOM. 1995. Vol. 47. Issue 2. P. 22–25.
18. Patent no. 5658447, The United States of America, Cl.[6] C25C 3/00, C25C 3/06, C25C 3/08, C25C 7/00. Electrolysis Cell and Method for Metal Production / K.D. Watson, D.D. Juric, R.W. Shaw, G.J. Houston; Comalco Aluminium Limited. No. 454183. Filed 17.12.1993; published 19.08.1997.
19. Makyta M., Danek V., Haarberg G.M., Thonstad J. Electrodeposition of titanium diboride from fused salts // Journal of Applied Electrochemistry. 1996. Vol. 26. Issue 3. P. 319–324.
20. Kaptay G., Devyatkin S.V. On possibility of preparation of titanium diboride cathode coating in situ in the aluminium electrolysis cell by electrochemical synthesis // Proceeding of VIII International Congress of ICSOBA. (Mailand, 16–18 April 1997). Mailand, 1997. P. 135–144.
21. Devyatkin S.V., Kaptay G., Poignet J.C., Bouteillon J. Electrochemical synthesis of titanium diboride coatings from cryolite melts // Molten Salts Forum (Geneva, 30 March 1998). Trans. Tech. Publications, Switzerland, 1998. Vol. 5. No. 6. P. 331–334.
22. Kaptay G. and Devyatkin S.V. Titanium diboride coating preparation in situ in the cell by electrochemical synthesis // X Al symposium (Bratislava, 28 January 1999). Bratislava, 1999. P. 80–84.
23. Devyatkin S.V. and Kaptay G. Chemical and Electrochemical Behavior of Titanium Diboride in Cryolite-Alumina Melt and in molten aluminium // Journal of Solid-State Chemistry. 2000. No. 154. P. 107–109.
24. Горланов Е.С., Архипов Г.В., Иванова А.М. Разработка технологии создания Al-смачиваемого покрытия на углеродном катоде. Части 1–4. // XXXI Междунар. конф. «ИКСОБА» и XIX Междунар. конф. «Алюминий Сибири»: сб. научн. статей (г. Красноярск, 4–6 сентября 2013 г.). Красноярск: Изд-во «Версо», 2013. С. 634–692.
25. Bradford D.R. Inert Anode Metal Life in Low Temperature Reduction Process // Final Technical Report of Northwest Aluminum Technologies. Award Number:

DE-FC36-98ID13662. 2005. 101 p. [Электронный ресурс]. URL: https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/DE2006841153.xhtml (15.02.2018).
26. Bao Shengzhong, Chai Dengpeng, Shi Zhirong, Wang Junwei, Liang Guisheng, Zhang Guisheng. Effects of Current Density on Current Efficiency in Low Temperature Electrolysis with Vertical Electrode Structure // Light Metals. 2018. P. 611–619. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_79
27. Wang Zhaohui, Friis J., Ratvik A.P. Transport of Sodium in TiB_2 Materials Investigated by a Laboratory Test and DFT Calculations // Light Metals. 2018. P. 1321–1328. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_173
28. Горланов Е.С. Особенности применения твердых электродов для электролиза криолитоглиноземных расплавов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 2. С. 356–366. http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-356-366
29. Arkhipov G.V., Gorlanov E.S. Development of Technology for Producing a Wettable Coating on a Carbon Cathode by Electrodeposition // Light Metals. 2012. P. 1367–1372.
30. Gorlanov E.S., Bazhin V.Yu. Nano- and the Microdimensional Coats Polycrystal Titanium-Containing the Bases a Method of Electrochemical Boronizing // Smart Nanocomposites. 2016. Vol. 7. No. 1. P. 75–88.
31. Пат. 2603407, Российская Федерация, B22F 9/18, C01B 35/04, C01G 23/00. Способ получения порошка диборида титана / Е.С. Горланов, В.Ю. Бажин, А.В. Смань; заявитель и патентообладатель ООО «ЭКСПЕРТ-АЛ». Заявл. 30.04.2015; опубл. 27.11.2016. Бюл. № 33.
32. Gorlanov E.S., Bazhin V.Yu., Fedorov S.N. Carbothermic Synthesis of Titanium Diboride: Upgrade // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2018. Vol. 11. No. 2. P. 156–166. http://dx.doi.org/10.17516/1998-2836-0065

References

1. Andrieux L. Recherches Sur L' Electrolyse des Oxydes Metalliques Dissous Dans L'Anhydride Borique Ou Dans Les Borates Fondus. *Ann. Chimie.* 1929;12:423–507.
2. Andrieux L. Sur la preparation et les proprietes des borures de tantale et de columbium. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de L' Academie des Sciences*. 1929;12:1279–1281.
3. Acad CR, Andrieux L. Barletty Synthesis of Refractory Metals Borides from Melts*. Sci.* 1932;194(12):1573–1575.
4. Andrieux L, Weiss G. Mémoires présentés a la société chimique. *Bulletin de la Société Chimique de France*. 1948;15:598–603.
5. Schlain D, McCawley FX, Wyche CJ. Electrodeposition of titanium diboride coatings. Journal of Electrochemical Society. 1969;116(9):1227–1228. https://doi.org/10.1149/1.2412284
6. Gomes JM, Uchida K. *Electrolytic Preparation of Titanium and Zirconium Diborides Using a Molten, Sodium Salt Electrolyte*. Patent US, no. 3775271; 1973.
7. Makyta M, Matiasovsky M, Fellner P. Mechanism of the cathode process in the electrolytic boriding in molten salts. Electrochimica Acta. 1984;29(12):1653–1660. https://doi.org/10.1016/0013-4686(84)89006-4
8. Makyta M, Grjothheim K, Matiasovsky K. Electrodeposition of TiB2 Powders and Coatings. In: VI Aluminium Simposium. 12–17 August 1988, Banska Bystrica. Banska Bystrica; 1988, p. 107–114.
9. Makyta M, Danek V, Haarberg GM, Thonstad J. Electrodeposition of titanium diboride from fused salts. Journal of Applied Electrochemistry. 1996;26(3):319–324.
10. Townsend DW. *Supersaturation plating of aluminum wettable cathode coatings during aluminum smelting in drained cathode cells*. Patent US, no. 5028301; 1991.
11. Deviatkin SV, Kaptay G, Berecz E. High-Temperature Electrochemical Synthesis of TiB2 from Cryolite-Alumina Melts Containing Oxides of Boron and Titanium. Proceeding of the Ninth International Symposium on Molten Salts. 22 May 1994, San Francisco. San Francisco; 1994, vol. 94, no. 13, p. 548–557.
12. McClung M, Browning J, Carte S, Lightle C, Love RO, Zerkle R. Plant Experience with an Experimental Titanium Diborid Cell. Light Metals. 2004:399–404.
13. Gorlanov ES, Nikiforov SA. An alternative production technology of a wettable protective coating on the surface of a carbon-graphite bottom of an aluminum cell. In: *Alyuminij Sibiri: sbornik dokladov XII Mezhdunarodnoj konferencii* = Aluminum of Siberia: Proceedings of XII International Conference. 15–18 September 2006, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2006, p. 91–95. (In Russ.)
14. Gorlanov ES, Batrachenko AA, Smailov BSh-A, Skvortsov AP. Testing Baked Anodes with an Increased Vanadium Content. Metallurgist. 2018;62(1–2):62–69. https://doi.org/10.1007/s11015-018-0626-x
15. Gorlanov ES, Batrachenko AA, Smailov BSh-A, Morozov AYu. Role of Vanadium in Aluminum Electrolyzer Melts. Metallurgist. 2018;62(9–10):1048–1053. https://doi.org/10.1007/s11015-019-00752-8
16. Gorlanov ES, Bazhin VYu. *Titanium diboride for aluminum electrolysis cells*. *Review*. St. Petersburg; 2019. 439 p. (In Russ.)
17. James BJ, Welch BJ, Hyland MM, Metson JB, Morrison CD. Interfacial Processes and the Performance of Cathode Linings in Aluminum Smelters. JOM. 1995;47(2):22–25.
18. Watson KD, Juric DD, Shaw RW, Houston GJ. Electrolysis Cell and Method for Metal Production. Patent US, no. 5658447; 1997.
19. Makyta M, Danek V, Haarberg GM, Thonstad J. Electrodeposition of titanium diboride from fused salts.

Journal of Applied Electrochemistry. 1996;26(3):319–324.
20. Kaptay G, Devyatkin SV. On possibility of preparation of titanium diboride cathode coating in situ in the aluminium electrolysis cell by electrochemical synthesis. Proceeding of VIII International Congress of ICSOBA. 16–18 April 1997, Mailand. Mailand; 1997, p. 135–144.
21. Devyatkin SV, Kaptay G, Poignet JC, Bouteillon J. Electrochemical synthesis of titanium diboride coatings from cryolite melts. Molten Salts Forum. 30 March 1998, Geneva. Geneva: Trans. Tech. Publications. Switzerland; 1998, vol. 5, no. 6, p. 331–334.
22. Kaptay G, Devyatkin SV. Titanium diboride coating preparation in situ in the cell by electrochemical synthesis. X Al symposium. 28 January 1999, Bratislava. Bratislava. 1999, p. 80–84.
23. Devyatkin SV and Kaptay G. Chemical and Electrochemical Behavior of Titanium Diboride in Cryolite-Alumina Melt and in molten aluminium. Journal of Solid-State Chemistry. 2000;154:107–109.
24. Gorlanov ES, Arkhipov GV, Ivanova AM. Development of the production technology for an Al-wettable coating on the carbon cathode. Parts 1–4. *XXXI Mezhdunarodnoj konferencii "IKSOBA" i XIX Mezhdunarodnoj konferencii "Alyuminij Sibiri": sbornik nauchnnyh statej* = Proceedings of the XXXI International Conference "IKSOBA" and the XIX International Conference "Aluminum of Siberia": collection of scientific articles. 4–6 September 2013, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Verso; 2013, 634–692.
25. Bradford DR. Inert Anode Metal Life in Low Temperature P/Reduction Process. Final Technical Report of Northwest Aluminum Technologies. Award Number: DE-FC36-98ID13662. 2005;101 p. Available from: https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/search Results/titleDetail/DE2006841153.xhtml [Accessed 15th February 2018].
26. Bao Shengzhong, Chai Dengpeng, Shi Zhirong, Wang Junwei, Liang Guisheng, Zhang Guisheng. Effects of Current Density on Current Efficiency in Low Temperature Electrolysis with Vertical Electrode Structure. Light Metals. 2018:611–619. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_79
27. Wang Zhaohui, Friis J, Ratvik AP. Transport of Sodium in TiB2 Materials Investigated by a Laboratory Test and DFT Calculations. Light Metals. 2018;1321–1328. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_173
28. Gorlanov ES. Features of solid electrode application for cryolite-alumina melt electrolysis. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(2):356–366. (In Russ.) http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-356-366
29. Arkhipov GV, Gorlanov ES. Development of Technology for Producing a Wettable Coating on a Carbon Cathode by Electrodeposition. Light Metals. 2012;1367–1372.
30. Gorlanov ES, Bazhin VYu. Nano- and the Microdimensional Coats Polycrystal Titanium-Containing the Bases a Method of Electrochemical Boronizing. Smart Nanocomposites. 2016;7(1):75–88.
31. Gorlanov ES, Bazhin VYu, Sman AV. *A method of titanium diboride powder obtaining*. Patent RF, no. 2603407; 2016. (In Russ.)
32. Gorlanov ES, Bazhin VYu, Fedorov SN. Carbothermic Synthesis of Titanium Diboride: Upgrade. Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2018;11(2):156–166. http://dx.doi.org/10.17516/1998-2836-0065

Критерии авторства

Горланов Е.С. получил и оформил научные результаты и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Authorship criteria

Gorlanov E.S. 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

Горланов Евгений Сергеевич,
кандидат технических наук,
заместитель генерального директора,
ООО «ЭКСПЕРТ-АЛ»,
199106, г. Санкт-Петербург,
Средний просп. В.О., 86/А, Россия;
✉ e-mail: gorlanove@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Evgeniy S. Gorlanov,
Cand. Sci. (Eng.),
Deputy General Director of EXPERT-AL LLC,
86/A, Sredniy pr., V.O. Saint-Petersburg
199106, Russia;
✉ e-mail: gorlanove@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article
УДК 669.716
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1228-1236

Моделирование работы печи гомогенизации для решения задач управления

© Т.В. Пискажова, Т.В. Донцова, И.В. Блинов
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме: Целью работы является создание для задач управления математической модели тепловой работы печи, на основе которой может быть реализован «виртуальный двойник» печи гомогенизации. В последнее время показатели качества прогрева алюминиевых полуфабрикатов и изделий перед дальнейшей обработкой, в процессах старения или закаливания становятся особенно актуальными, в т.ч. и в связи с внедрением на металлургических предприятиях международного стандарта качества ISO. При этом существующие системы контроля параметров печей нагрева осуществляют в основном регулирование локального нагревателя по измерениям температуры воздуха возле этого нагревателя, задача поддержания нужного прогрева объема всей печи и садки в таком управлении трудновыполнима и требует постоянной настройки пропорционально-интегрально-дифференцирующих регуляторов опытным сотрудником. Энергоемкость обработки алюминия также высока, при этом не все предприятия имеют возможность замены устаревших печей, и тогда возможности ресурсосбережения лежат только в области улучшения систем управления. В частности, перспективным направлением является замена традиционного регулирования по отклику упреждающим регулированием. Поэтому разработка математических моделей и программного обеспечения, позволяющих рассчитывать и предсказывать температуры различных областей печи, нагреваемых материалов в зависимости от изменения условий нагрева, является актуальной задачей. Моделирование и исследования проведены с использованием обыкновенных дифференциальных уравнений и явных разностных схем. В статье предложена динамическая модель теплообмена в печи гомогенизации и выполнены тестовые расчеты, показывающие применимость этой модели к выбору режимов и алгоритмов нагрева; также модель может быть положена в основу разработки цифрового двойника печи. Представленные модели и методы расчета применимы в качестве разработки современных систем управления и оптимизации нагрева не только металлоизделий, но и любых материалов.

Ключевые слова: конвективный нагрев, моделирование нагрева материалов, печь гомогенизации, автоматизированная система управления печью

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

Для цитирования: Пискажова Т.В., Донцова Т.В., Блинов И.В. Моделирование работы печи гомогенизации для решения задач управления. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 6. С. 1228–1236. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1228-1236

Modeling homogenizing furnace operation to solve control tasks

Tatiana V. Piskazhova, Tatiana V. Dontsova, Igor V. Blinov
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: The purpose of the work is to create a mathematical model of furnace thermal operation for control problems, on the basis of which a "virtual twin" of the homogenizing furnace can be implemented. Recently, the heating quality indicators of aluminum semi-finished products and products before further processing are becoming particularly relevant in the processes of aging or hardening also due to the introduction of the international quality standard ISO at metallurgical enterprises. At the same time, the existing control systems of heating furnace parameters mainly regulate the local heater by measuring the air temperature near it. The task of maintaining the desired heating volume of the entire furnace and the charge is quite difficult under this type of control and requires constant adjustment of the proportional-integral-differentiating regulators by an experienced employee. The energy intensity of aluminum processing is also high but not all enterprises are able to replace outdated furnaces. Then the resource-saving opportunities center around the improvement of control systems. In particular, the replacement of traditional response regulation with proactive regulation is a promising direction. Therefore, the development of mathematical models and software enabling to calculate and predict the temperatures of different areas of a furnace and heated materials depending on the change in heating conditions is a relevant task. Modeling and studies are carried out using ordinary differential equations and explicit difference schemes.

The paper proposes a dynamic model of heat transfer in a homogenizing furnace and performs test calculations demonstrating the applicability of this model to the selection of heating modes and algorithms. The model can also be used as a basis for the development of a furnace digital twin. The presented models and calculation methods are applicable as developments of modern control systems and heating optimization of not only metal products but any materials.

***Keywords**:* convective heating, simulation of material heating, homogenizing furnace, furnace automated control system

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

For citation: Piskazhova TV, Dontsova TV, Blinov IV. Modeling homogenizing furnace operation to solve control tasks. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1228–1236. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1228-1236

1. ВВЕДЕНИЕ

Термическая обработка слитков и деформированных полуфабрикатов является мощным средством воздействия на их структуру и свойства. Для алюминиевых сплавов широкое распространение в металлургическом производстве получили следующие виды термообработки: отжиг, закалка, старение[1] [1].

Гомогенизация – это разновидность отжига, которая применяется при производстве деформированных полуфабрикатов. Слиток с неоднородной, термодинамически неустойчивой структурой подвергают отжигу, в результате которого его структура становится гомогенной, пластичность повышается, что позволяет значительно интенсифицировать последующую обработку давлением (прессование, прокатка) и уменьшить технологические отходы.

Температура гомогенизации для промышленных алюминиевых сплавов колеблется в пределах от 450 до 600°С, а выдержка – от 4 до 36 ч. Время выдержки выбирается экспериментально[1] [1].

Термообработку материалов осуществляют в печах конвективного нагрева, реализуемого за счет горячего воздуха, перемещаемого вентиляторами в электрической печи или газовоздушной смеси, выделяющейся при горении топлива [2].

Предполагается, что электрические печи сопротивления, используемые для термической обработки изделий, должны изменять свою температуру в соответствии с заданным режимом обработки. Однако существующие системы управления не всегда позволяют обеспечить требуемое качество нагрева материалов, тогда как от условий нагрева зависит качество, количество и себестоимость готовой продукции.

Несмотря на то, что печи сопротивления постоянно усовершенствуются, вопрос модернизации их систем управления остается актуальным[2] [3, 4]. Решение задачи важно как с т.зр. снижения энергозатрат, так и улучшения равномерности распределения температур в камере печи [3].

Правильный нагрев материала достигается в результате соблюдения нескольких взаимозависимых условий. Основной параметр – это продолжительность нагрева. Гомогенизация не должна быть излишне длительной, т.к. может привести к отрицательным эффектам, например, образованию вторичной водородной пористости в слитке. Скорость охлаждения при гомогенизации обычно не регламентируют, слитки охлаждают с печью или на воздухе. При таком сравнительно медленном охлаждении растворенные легирующие компоненты снова выделяются из твердого раствора в виде вторичных интерметаллических кристаллов. Однако эти кристаллы гораздо меньше имевшихся до гомогениза-

[1]Кривандин В.А., Арутюнов В.А., Белоусов В.В., Крупенников С.А., Сборщиков Г.С., Кобахидзе В.В. [и др.]. Теплотехника металлургического производства: в 2 т. Т. 1. Теоретические основы металлургического производства: учеб. пособ. для вузов. М.: МИСиС, 2002. 608 с.

[2]Горячих Е.В. Разработка способов и алгоритмов управления электрическими печами сопротивления, обеспечивающих временную и пространственную равномерность нагрева: дис. … канд. техн. наук: 05.09.10. М., 2016. 137 с.

ции эвтектических включений и более равномерно распределены, поэтому пластичность сплава остается достаточно высокой[1] [1].

Другим важным показателем является равномерность нагрева, представляющая собой разность температур поверхности и центра металла при выдаче из печи. В зависимости от вида дальнейшей обработки заготовок предъявляются определенные требования к этому показателю. Вместе с тем основным регулируемым входным параметром при управлении нагревом металла является температура рабочего пространства печи. Очевидно, что одного этого показателя недостаточно для обеспечения равномерного нагрева материала. И более важным показателем все-таки является непосредственно температура самого металла. При этом интерес представляет градиент температур по толщине заготовки. Понятно, что техническое решение этой задачи путем непосредственного непрерывного замера для всех заготовок в условиях работающей печи невозможно.

Решению подобных задач посвящено некоторое количество исследований [5–15]. Например, в работе [5] предложено проведение распределенных измерений температуры воздуха и поверхности металла в разных зонах печи. Градиент температур по толщине заготовки определяют расчетным путем. Полученные результаты сравнивают с действительными значениями для контрольной заготовки и уточняют. Показано [6], что расчет температуры прогрева плиты может быть выполнен на основании одномерного уравнения теплопроводности и измеренной температуры воздуха в печи.

В нескольких работах [7, 8] показана возможность использования нейронных сетей для предсказания температур нагрева. Авторами [9] предложена система управления Level-2-Computer, повышающая эффективность работы тепловой печи в линии термообработки листовой стали. Система включает в себя систему контроля и сетевую структуру Level-2, разработанное программное обеспечение и блок-схему основной программы, а также расчетные формулы математической модели печи. В работе представлены экспериментальные данные, подтверждающие сокращение энергопотребления печи. В исследовании [10] предлагается решение по управлению туннельной печи термической обработки, используемой в металлургии. Разработанная математическая модель нагрева представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений с решением аналитическим методом. На основании полученной математической модели, используя теорию нелинейных систем, производится настройка пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД)-регулятора.

Разработаны [11–13] математические модели для описания тепловых режимов работы электрических печей сопротивления и регулирования режимов их нагрева. Работы выполнены применительно к нагреву стали [11] и других материалов [12], в т.ч. с учетом окалинообразования [13].

Предложен [14] способ быстрого и экономного нагрева промышленных печей, исходя из онлайн-показаний датчиков давления пара, расположенных в разных частях футеровки печи.

В работе [15] предложены модель и алгоритм регулирования температуры поверхности и середины изделий в садке в зависимости от температуры воздуха в печи.

В настоящем исследовании считаем необходимым рассмотреть достаточно простую балансовую модель тепловой работы печи, которая объединяет в себе теплообмен основных областей аппарата и может быть главной для необходимого дальнейшего усовершенствования как модели, так и управляющих алгоритмов.

2. УСТРОЙСТВО ПЕЧЕЙ НАГРЕВА С ВЫКАТНЫМ ПОДОМ И ИХ АВТОМАТИЗАЦИЯ

Печь представляет собой теплоизолированный рабочий объем (в нашем случае размерами 12×3,6×1,8 м) с выдвижным подом в виде футеровочного стенда, пере-

мещаемого на катках по рельсам, залитым в бетон. Нагрев осуществляется с помощью 12 калориферов общей термической мощностью 1500 кВт, установленных в специальные проемы на своде. Перемещение горячего воздуха в рабочем пространстве осуществляется с помощью вентиляторов. Общий вид печи представлен на рис. 1.

Максимальная масса садки (загружаемого материала в печь) составляет 60 т. Время вывода печи на режим гомогенизации (580–590ºС) – 8–17 ч.

Алгоритм автоматизации работы печи сводится к выводу металла на температуру гомогенизации и ее последующего поддержания на этом уровне в течение установленного времени гомогенизации. Для измерения температуры металла в него закладываются термопары в нескольких местах.

В каждой зоне нагрева температура воздуха поддерживается между уставками регулятора $T_{\text{возд}}$ (температуры нагрева) и $T_{\text{возд.макс}}$ (максимальной температуры нагрева). Температура металла, соответственно, поддерживается между уставками регулятора $T_{\text{мет.мин}}$ и $T_{\text{мет.макс}}$. Уставка регулятора соответствующих зон нагрева печи варьируется в зависимости от изменения температуры металла. Отсчет времени гомогенизации начинается только при удовлетворении температуры металла уставкам регуляторов в каждой измеряемой точке.

Структурная схема системы управления (СУ) печи гомогенизации представлена на рис. 2 (здесь: ПК – персональный компьютер, АСУ – автоматизированная система управления, ПЛК 1, ПЛК 2 – программируемый логический контроллер 1 и 2, соответственно).

Основными управляющими воздействиями в печи гомогенизации являются сигналы, поданные с программируемого логического контроллера на центробежные вентиляторы и нагреватели печи. В рабочее изолированное положение печь приводится по сигналу приводу пода.

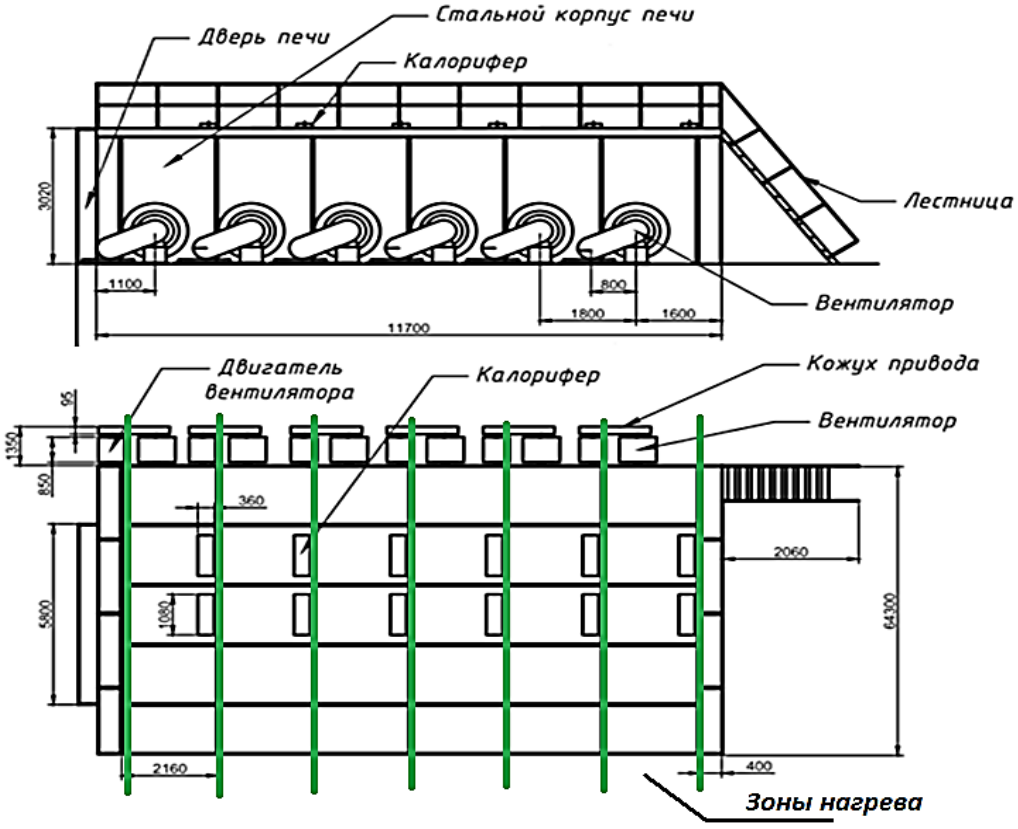


Рис. 1. Общий вид печи гомогенизации
Fig. 1. General view of the homogenizing furnace

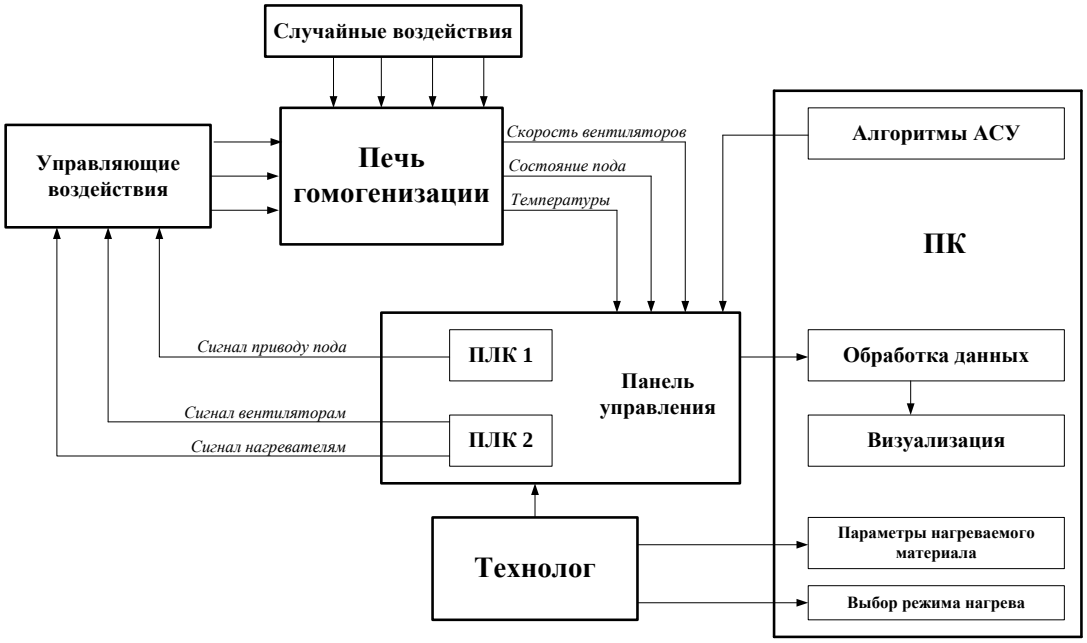


Рис. 2. Структурная схема системы управления печи гомогенизации
Fig. 2. Structural diagram of the homogenizing furnace control system

Выходными параметрами печи гомогенизации являются значения температур рабочего пространства, скорости вращения вентиляторов и состояния пода (задвинут или выдвинут).

В лучшем случае перед запуском процесса нагрева технолог на персональном компьютере задает параметры нагреваемого материала и выбирает режим нагрева. Там же отображаются измеряемые параметры процесса и вводятся алгоритмы автоматизированной СУ (АСУ). Авторам данной статьи неизвестно о реализованной в производственной практике такой организации верхнего уровня АСУ технологических процессов в печи.

Случайные воздействия включают в себя разрушение футеровки, неучтенные свойства металла (дефекты), обрывы датчиков температур, поломки центробежных вентиляторов или нагревателей.

3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ПЕЧИ И ТЕСТОВЫЕ РАСЧЕТЫ

Расчет работы печи и нагрева материалов может состоять из нескольких блоков (расчетов):

– изменения температуры греющей среды в зависимости от изменения мощности в печи;

– самого изменения мощности, расчет теплопотерь футеровкой печи;

– нагрева материалов;

– выделения или поглощения тепла при сопутствующих реакциях или испарении влаги.

Температуры могут рассчитываться как средние по выделенному объему, так и в каждой точке печи и садки в зависимости от вида математической модели.

Теплообмен нагреваемых металлоконструкций с воздухом печи, а также стенками печи с внутренней и внешней средой при некоторых допущениях может быть записан системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$m_{возд} \cdot c_{возд} \cdot \frac{dT_{возд}}{dt} = \\ = Q - Q_{возд-мет} - Q_{возд-стен}; \quad (1)$$

$$m_{мет} \cdot c_{мет} \cdot \frac{dT_{мет}}{dt} = \\ = Q_{возд-мет} - Q_{мет-под}; \quad (2)$$

$$m_{стен} \cdot c_{стен} \cdot \frac{dT_{стен}}{dt} = \\ = Q_{возд-стен} - Q_{стен-цех}, \quad (3)$$

где

$$Q_{возд-мет} = \alpha \cdot S \cdot \left(T_{возд} - \hat{T}_{мет}\right); \quad (4)$$

$$Q_{возд-стен} = \alpha \cdot S_{стен} \times \\ \times \left(T_{возд} - T_{стен-внутр}\right); \quad (5)$$

$$Q_{мет-под} = k \cdot S_{под} \cdot \left(T_{мет} - T_{под}\right); \quad (6)$$

$$k = \frac{2}{\frac{\delta_{мет}}{\lambda_{мет}} + \frac{\delta_{под}}{\lambda_{под}}}; \quad (7)$$

$$Q_{стен-цех} = \alpha_{цех} \cdot S_{цех} \cdot \left(T_{стен-нар} - T_{цех}\right), \quad (8)$$

где m_i, c_i – массы и теплоемкости указанных сред, $Q(t)$ – термическая мощность печи, α_i – коэффициенты теплообмена «поверхность-воздух», k – коэффициент теплопередачи, содержащий толщины и теплопроводности твердых слоев, λ_i – коэффициенты теплопроводности указанных сред.

Систему дифференциальных уравнений (1)–(3) будем решать численно, т.к. аналитическое решение не предусматривает произвольного изменения $Q(t)$. Так, например, расчет температуры воздуха в печи можно представить как

$$T_{возд}^{n+1} = T_{возд}^{n} + \\ + \frac{\Delta t \cdot \left(Q - Q_{возд-мет} - Q_{возд-стен}\right)}{C_{возд} \cdot m_{возд}}, \quad (9)$$

где Δt – шаг по времени, $T_{возд}^{n}$ и $T_{возд}^{n+1}$ – температуры на предыдущем и последующем временном шаге. Тепловые потоки также пересчитываются на каждом временном шаге по формулам (4)–(8).

Для определения стационарного баланса для начала расчета и динамического определения температуры стенок футеровки по толщине используем равенство тепловых потоков и законы теплопередачи[3] [16].

Для расчета была взята печь с указанными выше внутренними размерами, стандартно футерованная, масса садки 32 т алюминиевых изделий, где использованы известные значения теплофизических параметров садки, воздуха и футеровки из справочников. Печь была холодной – все начальные температуры равнялись 20°С. Модель позволяет использовать любые температуры в качестве начальных значений.

На рис. 3 приведен расчет изменения средних температур воздуха в печи для нагреваемых металлоизделий в зависимости от перемены подведенной мощности. Вначале были включены все нагреватели в течение почти 4 ч, далее (при достижении воздухом температуры 500°С) мощность периодически поддерживалась 100 и 500 кВт, затем еще была снижена. Металл при этом продолжал нагреваться. Имеются экспериментальные данные, которые свидетельствуют о таком же способе управления печью включением/выключением отдельных нагревателей, а также о временах нагрева воздуха и садки, соответствующих рассчитанным.

Видно, что за 12 ч средняя температура садки еще не вышла на требуемый режим гомогенизации. Температуры футеровки изменились следующим образом – внутренняя температура стенок повысилась до 300°С, наружная температура стенок печи – до 30°С.

В дальнейшем планируется рассчитывать управление нагревом в специализированной программной среде с разделением моделирования печи на секции (зоны нагрева на рис. 1). В этом случае подведенную термическую мощность $Q(t,x)$ можно оптимизировать не только по времени,

[3]Тинькова С.М. Теплофизика и металлургическая теплотехника: учеб. пос. Красноярск: Изд-во СФУ, 2017. 168 с.

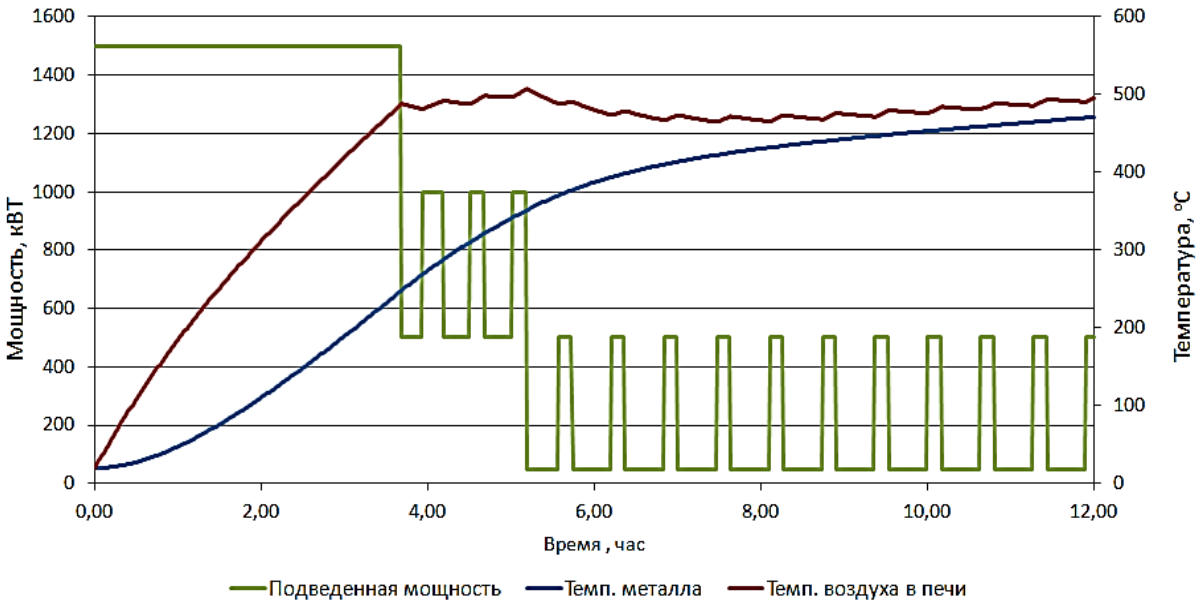


Рис. 3. График расчета нагрева садки и воздуха в печи
Fig. 3. Graph for calculating charge and air heating in the furnace

но и по координате за счет выключения отдельных нагревателей.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными параметрами правильного нагрева металлоизделий являются средняя температура металла и равномерность, представляющая собой разность температур поверхности и центра изделия при выдаче из печи. Вместе с тем, основным регулируемым входным параметром при управлении нагревом металла является температура рабочего пространства печи. Очевидно, что одного этого показателя недостаточно для обеспечения равномерного нагрева материала. Представлена модель нагрева воздушной среды и нагреваемых материалов в печи конвективного теплообмена, позволяющая отследить изменение средних температур греющей среды, нагреваемых материалов, футеровки печи, теплопотерь печью в окружающую среду. Модель предназначена для разработки алгоритмов управления печью и создания виртуального двойника печи. Представленные модели и методы расчета могут быть основой для разработки современных систем управления и оптимизации нагрева не только металлоизделий, но и любых материалов.

Библиографический список

1. Кривандин В.А., Марков Б.Л. Металлургические печи. М.: Металлургия, 1977. 464 с.
2. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Казяев Д.М. Исследование конвективного теплообмена в проходной печи, оснащенной скоростными горелками // Цветные металлы. 2011. № 12. С. 89–93.
3. Панферов В.И. Об экономичном управлении нагревом металла в промышленных печах // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2018. Т. 18. № 2. С. 71–80. https://doi.org/10.14529/ctcr180207
4. Горячих Е.В., Рубцов В.П., Щербаков А.В. Исследование влияния неоднородности электрической печи сопротивления как объекта управления // Электротехника. 2015. № 7. С. 41–45.
5. Мокрушин С.А. АСУ температурного режима электрических печей сопротивления // Группа компаний Альфа-Пром [Электронный ресурс]. URL: http://alfa-prom.ru/art_3_aut_asu_tr_oven.html (14.05.2018).
6. Zhang Kai, Shao Cheng. Advanced control techniques for reheating furnace and their development in iron and steel industry // Metallurgical Industry Automation. 2003. No. 1. P. 13–14.
7. Lahoucine-Abaih L., Bennekom A., Fathi M. Devel-

opment of an ANN for the prediction of heat treatment temperatures for martensitic stainless steels // IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Vigo, 4–7 June 2007). Vigo, 2007. P. 100–105.
8. Li Jing, Wang Jing, Hao Chun-hui, Zhang Yong-jun, Li Xiao-zhan, Wen Zhi. Research and application of process control system for roller hearth normalizing furnace // Metallurgical Industry Automation. 2009. Vol. 33. No. 2. P. 16–23.
9. Li Hongjie, Gong Xiulian, Wang Jianmei, Huang Qingxue. Research on level-2-computer control system for heat-furnace in plate heat treatment line // International Technology and Innovation Conference 2009 (ITIS 2009). 2009. [Электронный ресурс] URL: https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2009.1513 (27.07.2019) https://doi.org/10.1049/cp.2009.1513
10. Muresan V., Abrudean M. Temperature Modelling and Simulation in the Furnace with Rotary Hearth // Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR) (Cluj-Napoca, 28–30 May 2010). Cluj-Napoca, 2010. P. 147–152. https://doi.org/10.1109/AQTR.2010.5520900
11. Воронцов Ю.Е. Управление динамикой нагрева стали в двухзонной печи сопротивления с детерминированным регулятором температуры // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2015. № 3. С. 54–58.
12. Гринчук П.С. Математическое моделирование тепловых режимов работы электропечей сопротивления // Инженерно-физический журнал. 2010. Т. 83. № 1. С. 28–37.
13. Бирюков А.Б., Гинкул С.И., Гнитиев П.А., Олешкевич Т.Г. Математическое моделирование процессов тепловой обработки металла в печах с учетом окалинообразования // Сталь. 2016. № 8. С. 85–90.
14. Schemmel T., Thieser G., Pfitzner N., Kremer U. A novel method of online measurement to develop specific heating-up procedures for industrial furnaces // Light Metals. 2014. P. 1015–1017.
15. Белолипецкий В.М., Пискажова Т.В., Портянкин А.А., Зинченко Г.В. Модели нагрева материалов в печах конвективного теплообмена для решения задач автоматизации // Автоматизация в промышленности. 2017. № 12. С. 59–64.
16. Портянкин А.А., Тинькова С.М., Пискажова Т.В. Создание учебно-консультационной программы для расчета и визуализации параметров и переменных многослойной стенки // Решетневские чтения. 2013. Т. 2. С. 249–251.

References

1. Krivandin VA, Markov BL. *Metallurgical furnaces*. Moscow: Metallurgiya; 1977. 464 p. (In Russ.)
2. Vokhmyakov AM, Kazyaev MD, Kazyaev DM. Research of convective heat transfer in continuous furnace, equipped with speed burners. *Tsvetnyye metally* = Non-Ferrous Metals. 2011;12:89–93. (In Russ.)
3. Panferov VI. About economic management of heating metal in industrial furnaces. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika* = Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics. 2018;18(2):71–80. (In Russ.) https://doi.org/10.14529/ctcr180207
4. Goryachikh E.V., Rubtsov V.P., Shcherbakov A.V. Studying the influence of irregularity of an electric resistance furnace as a control object. *Eltktrotekhnika* = Russian Electrical Engineering. 2015;7:41–45. (In Russ.)
5. Mokrushin SA. Automated temperature control systems for electric resistance furnaces. *Group of Alfa-Prom companies*. Available from: http://alfa-prom.ru/art_3_aut_asu_tr_oven.html. The title from the screen [Accessed 14th May 2018]. (In Russ.)
6. Zhang Kai, Shao Cheng. Advanced control techniques for reheating furnace and their development in iron and steel industry. *Metallurgical Industry Automation.* 2003;1:13–14.
7. Lahoucine-Abaih L, Bennekom A, Fathi M. Development of an ANN for the prediction of heat treatment temperatures for martensitic stainless steels. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 4–7 June 2007, Vigo. Vigo; 2007. pp. 100–105.
8. Li Jing, Wang Jing, Hao Chun-hui, Zhang Yong-jun, Li Xiao-zhan, Wen Zhi. Research and application of process control system for roller hearth normalizing furnace. *Metallurgical Industry Automation*. 2009;33(2):16–23.
9. Li Hongjie, Gong Xiulian, Wang Jianmei, Huang Qingxue. Research on level-2-computer control system for heat-furnace in plate heat treatment line. *International Technology and Innovation Conference 2009 (ITIS 2009).* 2009. Available from: https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2009.1513 [Accessed 14th May 2018]. (In Russ.) https://doi.org/10.1049/cp.2009.1513
10. Muresan V, Abrudean M. Temperature Modelling and Simulation in the Furnace with Rotary Hearth. Proceedings of 2010 IEEE AQTR 2010. 28–30 May 2010, Cluj-Napoca. Cluj-Napoca; 2010, p. 147–152.
11. Vorontsov YuE. The control of steel heating dinamics in two-zone electric furnace of resistance with determined adaptive temperature regulator. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya* = Problems of Ferrous Metallurgy and Material Science. 2015;3:54–58. (In Russ.)
12. Grinchuk PS. Mathematical modeling of thermal operating regimes of electric resistance furnaces. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* = Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2010;83(1):30–40. (In Russ.)
13. Biryukov AB, Ginkul SI, Gnitiev PA, Oleshkevich TG. Mathematical modeling of metal heat processing in

furnaces taking into account scale formation. *Stal'* = Steel. 2016;8: 85–90. (In Russ.)
14. Schemmel T, Thieser G, Pfitzner N, Kremer U. A novel method of online measurement to develop specific heating-up procedures for industrial furnaces. *Light Metals.* 2014: 1015–1017.
15. Belolipetsky VM, Piskazhova TV, Portyankin AA, Zinchenko GV. Models of heating materials in convective heat transfer furnaces for solving automation tasks. Avtomatizatsiya v promyshlennosti = *Automation and Remote Control*. 2017;12:59–64. (In Russ.)
16. Portyankin AA, Tinkova SM, Piskozhova TV. Creation of the educational and consulting program for calculation and visualization of parameters and variables of the multilayered wall. *Reshetnevskie chteniya* = Reshetnev Readings. 2013;2:13–14. (In Russ.)

Критерии авторства

Пискажова Т.В., Донцова Т.В., Блинов И.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Piskazhova T.V., Dontsova T.V., Blinov I.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.

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

Пискажова Татьяна Валериевна,
доктор технических наук,
профессор кафедры автоматизации производственных процессов в металлургии,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
просп. Свободный, 79, Россия;
✉ e-mail: piskazhova@ya.ru

Донцова Татьяна Валентиновна,
кандидат технических наук, доцент,
заведующая кафедрой автоматизации производственных процессов в металлургии,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
просп. Свободный, 79, Россия;
e-mail: tdontsova@sfu-kras.ru

Блинов Игорь Валентинович,
магистрант,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
просп. Свободный, 79, Россия;
e-mail: krasnoyarskbliigor@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatiana V. Piskazhova,
Dr. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Automation of Industrial Processes in Metallurgy,
Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia;
✉ e-mail: piskazhova@ya.ru

Tatiana V. Dontsova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Automation of Industrial Processes in Metallurgy,
Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia;
e-mail: tdontsova@sfu-kras.ru

Igor V. Blinov,
Master Degree student,
Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia;
e-mail: krasnoyarskbliigor@gmail.com

Оригинальная статья / Original article
УДК 669.283
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1237-1246

Сравнительный анализ термохимического активирования молибденитового концентрата с магнезитом и бруситом

© Д.П. Хомоксонова, И.Г. Антропова
Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, г. Улан-Удэ, Россия

Резюме: Цель – установление физико-химических закономерностей и технологических параметров термохимического разложения молибденитового концентрата с использованием различных магниевых минералов (брусит $Mg(OH)_2$, магнезит $MgCO_3$) в окислительной среде. Для изучения составов и физико-химических свойств исходных материалов и продуктов взаимодействий использовались атомно-абсорбционная спектрометрия, фотоколориметрия, дифференциально-сканирующая калориметрия и рентгенофазовый анализ. Физико-химическое моделирование систем «MoS_2-$MgCO_3$-O_2» и «MoS_2-$Mg(OH)_2$-O_2» проведено с использованием универсальной программы определения равновесных параметров многокомпонентных гетерогенных систем «Terra» и метода Темкина-Шварцмана. Показано, что образующийся в процессе взаимодействий молибдат магния ($MgMoO_4$) устойчив на всем протяжении исследуемых температур (300–1150 К). Установлены технологические параметры спекания молибденитового концентрата с каждой из сырьевых добавок, обеспечивающих направленное превращение трудно вскрываемой минеральной формы в растворимую молибдатную фазу $MgMoO_4$ и оксида серы в нелетучий сульфат магния: температура – 600°С, продолжительность обжига – 60–90 мин, расход брусита или магнезита – 100–110% от стехиометрически необходимого для полного связывания молибдена и серы в огарок. Разработанный способ термохимического активирования молибденитового концентрата позволяет за счет использования в качестве сырьевой добавки магниевых минералов удешевить процесс термохимии и способствует эффективному взаимодействию продуктов разложения с образованием растворимых соединений $MgMoO_4$ и $MgSO_4$.

Ключевые слова: молибденовый концентрат, брусит, магнезит, термохимическое разложение

Информация о статье: Дата поступления 17 октября 2019 г.; дата принятия к печати 24 ноября 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2019 г.

Для цитирования: Хомоксонова Д.П., Антропова И.Г. Сравнительный анализ термохимического активирования молибденитового концентрата с магнезитом и бруситом. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 6. С. 1237–1246. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1237-1246

Comparative analysis of molybdenite concentrate thermochemical activation by magnesite and brucite

Daria P. Khomoksonova, Inna G. Antropova
Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to establish physico-chemical regularities and technological parameters of molybdenite concentrate thermochemical decomposition with the use of various magnesium minerals (brucite $Mg(OH)_2$, magnesite $MgCO_3$) in the oxidizing medium. The compositions and physico-chemical properties of initial materials and interaction products are studied by atomic absorption spectrometry, photocolorimetry, differential scanning calorimetry and x-ray phase analysis. Physical and chemical modeling of the systems MoS_2-$MgCO_3$-O_2 and MoS_2-$Mg(OH)_2$-O_2 is carried out by means of the universal program for determining the equilibrium parameters of multicomponent heterogeneous systems "Terra" and the Temkin-Schwarzman method. It is shown that magnesium molybdate ($MgMoO_4$) formed in the process of interactions is stable within the range of the studied temperatures from 300 K to 1150 K. We have determined the technological parameters of molybdenite concentrate sintering with each of the additives providing directed transformation of the refractory mineral form into the soluble molybdate phase $MgMoO_4$ and sulfur oxide into non-volatile magnesium sulfate: temperature 600°C, firing duration 60–90 min, consumption of brucite or magnesite is 100–110% of stoichiometrically required for complete binding of molybdenum and sulfur into a cinder. The developed method of molybdenite concentrate thermochemical activation makes it possible to reduce the cost of the thermochemistry process by using magnesium minerals as a raw material additive and promotes the effective interaction of decomposition products with the formation of soluble compounds $MgMoO_4$ and $MgSO_4$.

Keywords: molybdenite concentrate, brucite, magnesite, thermochemical decomposition

Information about the article: Received October 17, 2019; accepted for publication November 24, 2019; available online December 28, 2019.

For citation: Khomoksonova DP, Antropova IG. Comparative analysis of molybdenite concentrate thermochemical activation by magnesite and brucite. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(6):1237–1246. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1237-1246

1. ВВЕДЕНИЕ

Исходным сырьем для производства ферромолибдена, используемого для присадок молибдена в стали, и для получения химических соединений на основе молибдена различной степени чистоты являются молибденитовые концентраты, получаемые флотацией. Основной (широко применяемый в промышленности) способ разложения молибденитовых концентратов, независимо от типа выпускаемого продукта, окислительный обжиг, в результате которого получают огарок, состоящий из оксида молибдена (VI), загрязненного примесями. Для получения чистого оксида молибдена (VI) применяют метод возгонки либо гидрометаллургическую (химическую) переработку огарка [1]. Недостатками процесса окислительного обжига являются выделение сернистого газа, образование низковалентного оксида молибдена, трудности с контролем температуры.

Помимо обжига существуют различные схемы переработки молибденитовых концентратов и промпродуктов, в которых разложение осуществляется гидрометаллургическими методами, исключающими предварительный окислительный обжиг. К ним относятся разложение азотной, соляной кислотами, окисление молибденита кислородом под давлением в щелочном растворе, окисление растворами гипохлорита натрия, бактериальное выщелачивание и электроокислительное выщелачивание [1–11]. Также известны технологические варианты, в которых гидрометаллургическим операциям предшествуют пирометаллургические процессы вскрытия молибденитовых концентратов: окисление твердофазными окислителями ($NaNO_3$, KNO_3, $KClO_3$), низкотемпературное хлорирование, спекание с известью, сульфатом, сульфидом, хлоридом натрия и кальцийсодержащими добавками с последующим выщелачиванием [1, 12–19]. Степень извлечения молибдена этими методами высока, но все они имеют ряд недостатков: высокое потребление электроэнергии, использование химически чистых реагентов и сложного оборудования.

Цель настоящего исследования – установление физико-химических закономерностей и технологических параметров термохимического разложения молибденитового концентрата с использованием различных магниевых минералов (брусит $Mg(OH)_2$, магнезит $MgCO_3$) в окислительной среде.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В технологических исследованиях использовали молибденовый концентрат (масс. %: 47,2 Mo; 35,18 S) предприятия «Эрдэнэт» (Монголия). Результаты рентгенофазового анализа (РФА) подтвердили, что основной фазой исходной пробы образца является молибденит MoS_2. В качестве добавки в шихту использовали брусит Кульдурского месторождения (Еврейская автономная область) и магнезит Савинского месторождения (Иркутская область).

Термический анализ магнезита и брусита проводился методами термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии с применением синхронного термического анализатора STA 449 F1 Jupiter («Netzsch», Германия). Данный термический анализ позволяет выявить и исследовать фазовые превращения, протекающие в образцах при нагревании или охлаждении по термическим эффектам и потерям массы. Нагрев производили до 800°С со скоростью 10 град/мин в

атмосфере аргона.

Рентгенофазовый анализ исходных веществ и продуктов реакций окислительного обжига молибденитового концентрата определяли методом рентгеновской дифракции на дифрактометре D8 ADVANCE («Bruker AXS», Германия).

Химический состав исходных материалов и продуктов реакции термохимического разложения молибденового концентрата определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии на спектрометре SOLAARM6 («Thermo Electron», США) и фотоколориметрическим методом на спектрофотометре ПЭ–5300В («Экохим», Россия). Анализ на улетучивание серы проводили весовым методом по твердому остатку. Экспериментальные исследования процесса спекания молибденового концентрата с магнезитом и бруситом проводили в лабораторной муфельной печи СНОЛ 16251/9-И4.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В технологических исследованиях при спекании молибденитового концентрата в качестве сырьевых добавок использовали магнезит (масс. %: 46,6 MgO; 0,8 CaO) Савинского месторождения и брусит (масс. %: 61,4 MgO; 1,1 CaO) Кульдурского месторождения.

По результатам термического анализа природных соединений магнезита и брусита выявлено, что деструкция магнезита происходит в интервале температур 540–640°С. Эндоэффект с потерей массы 50,30% на термограмме соответствует разложению карбоната магния с образованием оксида магния (рис. 1). По данным термограммы, первый этап термодеструкции брусита с потерей массы 22,00% и образованием оксида магния протекает в диапазоне температур 325−450°С, а второй эндотермический максимум – в интервале температур 550–750°С с потерей массы 5,32% соответствует разложению небольшого количества примесного доломита (рис. 2) [20, 21].

Возможность образования молибдатов при нагревании ряда оксидов и карбонатов с оксидом молибдена (VI) была установлена Таммaном по термограммам нагревания их смесей. Оксиды и карбонаты магния активно реагируют с оксидом молибдена (VI), образуя молибдаты магния. Высокая химическая активность оксида молибдена (VI) в рассматриваемых реакциях объясняется двумя обстоятельствами:

1) низкой температурой начала спекания MoO_3 (550–600°С), при которой атомы приобретают достаточную подвижность для обмена местами;

2) сравнительно высокой упругостью пара при температурах выше 500°С, обусловливающей возможность протекания реакций с участием газовой фазы. В интервале температур 400–600°С дисульфид молибдена активно взаимодействует с кислородом с образованием MoO_3 и выделением сернистого газа SO_2 [1].

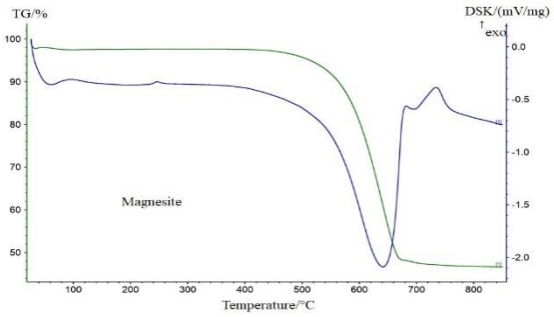


Рис. 1. Термограмма разложения магнезита
Fig. 1. Thermogram of magnesite decomposition

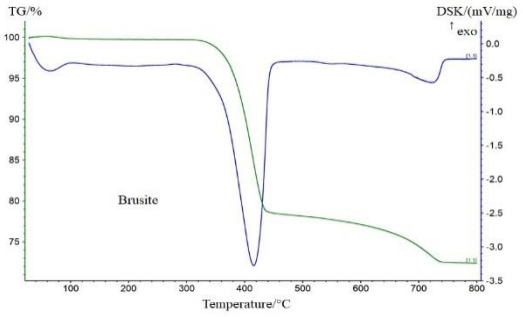


Рис. 2. Термограмма разложения брусита
Fig. 2. Thermogram of brucite decomposition

4. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕАКЦИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛИБДЕНИТА С МАГНЕЗИТОМ И БРУСИТОМ В ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ

Как известно, вероятность протекания любой химической реакции определяется изменением изобарно-изотермического потенциала (энергии Гиббса). Из ряда процессов, которые могут протекать в системе, термодинамически наиболее вероятным является тот, который сопровождается наибольшей убылью свободной энергии. Вычисление величины изменения свободной энергии при химических реакциях и констант равновесия обычно производится на основе стандартных значений изменения теплосодержания при образовании соединений и энтропий веществ при температуре 298 К[1].

Термодинамическую оценку вероятности протекания реакций проводили по методу Темкина и Шварцмана, по которому изобарно-изотермический потенциал определяется по данной формуле:

$$\Delta G_T^0 / T = \Delta H_{298}^0 / T - \Delta S_{298}^0 - \\ -(M_0 \Delta a + M_1 \Delta b + M_2 \Delta c).$$

Значения интегральных функций (M_0, M_1, M_2) этого уравнения для различных температур рассчитаны Темкиным и Шварцманом.

Взаимодействие молибденита с магниевыми соединениями с образованием молибдата магния можно выразить следующими реакциями:

$$MoS_2 + 3MgCO_3 + 4{,}5O_2 \rightarrow \\ \rightarrow MgMoO_4 + 2MgSO_4 + 3CO_2, \quad (1)$$

$$MoS_2 + 3Mg(OH)_2 + 4.5O_2 \rightarrow \\ \rightarrow Mg\ MoO_4 + 2MgSO_4 + 3H_2O. \quad (2)$$

Отметим образование сульфата магния:

$$2MgO + 2SO_2 + O_2 \rightarrow 2MgSO_4\,. \quad (3)$$

В результате расчетов получены уравнения зависимостей свободной энергии Гиббса от температуры для реакций:

$$\Delta G_T^0 = -1475{,}54 + 239{,}65T - T(62{,}685M_0 - \\ 76{,}38 + 4{,}28M_{-2}); \quad (4)$$

$$\Delta G_T^0 = -1599{,}1 - 307{,}15T - T(105{,}705M_0 - \\ 201{,}54M_1 - 6{,}61M_{-2}); \quad (5)$$

$$\Delta G_T^0 = -787{,}6 + 572{,}5T - T(-14{,}15M_0 + \\ 69{,}68M_1 + 1{,}6M_{-2}). \quad (6)$$

Рассчитанные по этим уравнениям значения свободной энергии Гиббса при различных температурах приведены в табл. 1.

Полученные при расчетах отрицательные значения свободной энергии Гиббса подтверждают возможность протекания реакций(1)–(3) с образованием молибдата и сульфата магния в изучаемом интервале температур.

Таблица 1

Результаты расчета значений свободной энергии Гиббса для реакций при различной температуре

Table 1

Calculation results of the Gibbs free energy values for reactions at different temperatures

№ реакции	ΔG_{298}^0, кДж/моль					
	673 К	773 К	873 К	973 К	1073 К	1173 К
(4)	-1396,3	-1381,3	-1367,9	-1356,0	-1345,6	-1336,4
(5)	-1395,7	-1365,4	-1334,5	-1302,8	-1270,2	-1236,5
(6)	-460,8	-404,8	-349,3	-294,4	-240,1	-186,1

[1]Binnewies M., Milke E. Thermochemical Data of Elements and Compounds. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. 928 p.

Метод равновесного термодинамического моделирования позволяет, учитывая большинство потенциально возможных в равновесии индивидуальных веществ, найти путем максимизации энтропии или минимизации энергии Гиббса (термодинамической системы) ее полный химический состав при заданных термодинамических параметрах (например, давлении и температуре).

Расчеты полного равновесного состава для изучаемых систем MoS_2–$Mg(CO_3)_2$–O_2 и MoS_2–$Mg(OH)_2$–O_2 были выполнены до температуры 1173 К и при давлении 0,1 МПа. С помощью полученных данных можно прогнозировать распределение элементов по фазам. На рис. 3, 4 представлены диаграммы равновесного распределения компонентов систем «MoS_2–$3MgCO_3$–$4{,}5O_2$», «MoS_2–$3MgOH_2$–$4{,}5O_2$». Установлено, что соединение молибдата магния устойчиво во всем диапазоне температур, а сульфат магния начинает свыше 800 К медленно диссоциировать на оксид магния MgO и сернистый ангидрид SO_2.

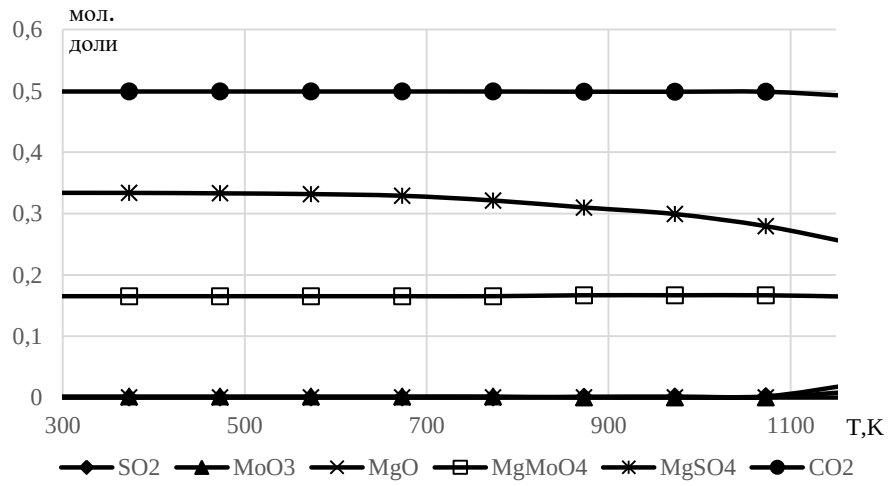


Рис. 3. Изменение фазового состава в системе MoS_2–$3MgCO_3$–$4{,}5O_2$
Fig. 3. Change in phase composition in the system MoS_2–$3MgCO_3$–$4.5O_2$

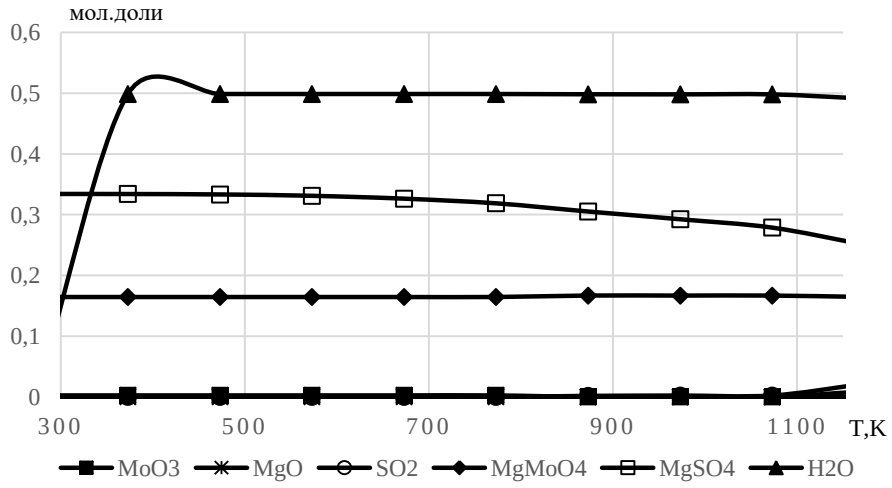


Рис. 4. Изменение фазового состава в системе MoS_2-$3MgOH_2$-$4{,}5O_2$
Fig. 4. Change in phase composition in the system MoS_2-$3MgOH_2$-$4.5O_2$

Процесс термохимического активирования молибденита с магнезитом в атмосфере кислорода воздуха аналогичен взаимодействию с бруситом, единственной отличительной особенностью является наличие в продуктах взаимодействий CO_2.

Экспериментальную проверку условий термохимического разложения молибденитового концентрата с использованием магнезита и брусита в качестве добавок проводили в лабораторных условиях. Молибденитовый концентрат, химический состав которого представлен в табл. 2, в количестве 5 г смешивали с магнезитом или бруситом крупностью -0,07 мм, затем навеску шихты помещали в электрическую муфельную печь марки СНОЛ 12/12-В.

Установлены оптимальные условия термохимического разложения молибденитового концентрата с каждой из минеральных добавок, при которых молибденит переходит в растворимые формы: температура – 600°С, продолжительность – 60 мин, расход магнезита – 7,5 г (на 5 г концентрата), что составляет 110% от стехиометрически необходимого количества для связывания с оксидом молибдена и сернистым газом; при спекании с бруситом 5,5 г, что составляет 100% от стехиометрически необходимого.

Из рентгенограмм (см. рис. 5) очевидно, что в результате термохимического активирования молибденитового концентрата с использованием магнезита и брусита конечными продуктами взаимодействий при оптимальных условиях являются молибдат, сульфат магния и оксид молибдена (VI). Результаты химического анализа показали, что при использовании брусита в качестве добавки потери серы составили 0,8%, молибдена – менее 0,5 %.

Таблица 2

Химический состав молибденитового концентрата

Table 2

Chemical composition of molybdenite concentrate

Компоненты, масс. %							
MoS_2	FeS_2	CuS	Cr_2S_3	ZnS	PbS	MnS_2	Прочие*
84,30	6,27	3,49	0,22	0,17	0,04	0,02	5,49

Примечание: *SiO_2, ReS_2, Al_2O_3

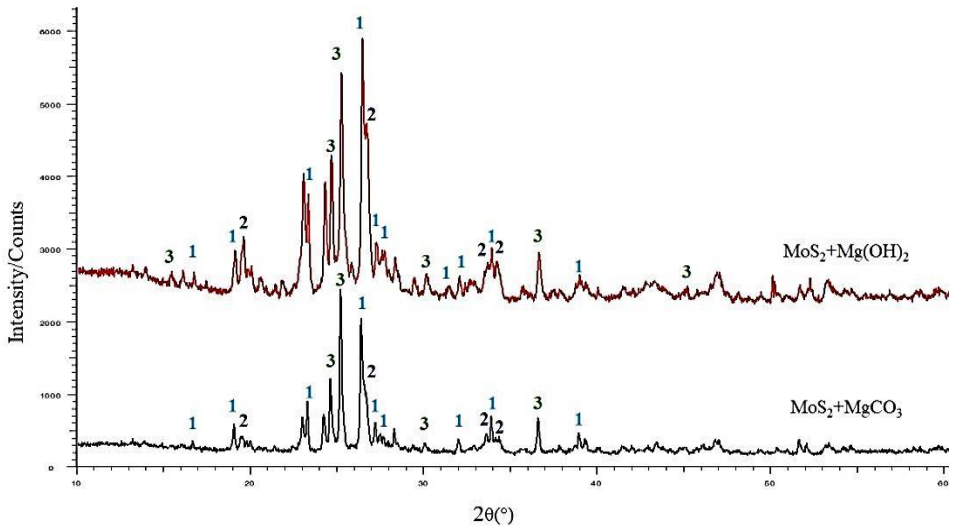


Рис. 5. Рентгенограммы спеков после спекания молибденита с магнезитом и бруситом: 1 – $MgMoO_4$; 2 – MoO_3; 3 – $MgSO_4$
Fig. 5. XRD patterns of molybdenite concentrate after sintering with magnesite and brucite: 1 – $MgMoO_4$; 2 – MoO_3; 3 – $MgSO_4$

При использовании магнезита аналогичные потери серы – 1,4%, молибдена – менее 1%. В результате более низкого температурного диапазона разложения брусита (325−450°С) и высокого содержания MgO по сравнению с магнезитом было обеспечено наиболее эффективное взаимодействие продуктов разложения с минимальной потерей оксидов молибдена и серы в газовую фазу. Также при применении брусита в атмосферу не выделяется углекислый газ [22, 23]. Таким образом, основные ценные компоненты исходного сырья с минимальными потерями в процессе термохимического активирования становятся пригодными для последующего выщелачивания растворами карбоната натрия.

щелачивания представлены в табл. 3.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен термодинамический анализ взаимодействия молибденита с карбонатом и гидроксидом магния в окислительной среде. Результаты термодинамических расчетов показали возможность образования в конденсированной фазе молибдата и сульфата магния. Оптимальные условия процесса обжига молибденита, определенные термодинамическими расчетами, подтверждены экспериментально. Близкие температуры термического разложения молибденита, магнезита и брусита обеспечивают наиболее эффективное взаи-

Таблица3

Технологические параметры обжига и выщелачивания

Table 3

Technological parameters of sintering and leaching

Добавка		Содержание в шихте, %		Содержание в спеке, %		Извлечение в раствор
Наименование	Расход, %	Mo	S	Mo	S	Mo
Брусит	100	19,2	17,8	18,8	15,4	98,9
Магнезит	110	20,8	17,7	20,7	17,5	99,6

Для полного перевода соединений молибдена в раствор спеки подвергали выщелачиванию 15-процентным раствором карбоната натрия при постоянном механическом перемешивании. Обработку вели в течение 60 мин при Т:Ж равном 1:4, температуре 60–80°С. Извлечение молибдена в раствор составило 99%. По результатам РФА основными фазовыми составляющими кеков являются кварц и гематит. Основные технологические параметры обжига и вымодействие продуктов разложения с образованием растворимых соединений $MgMoO_4$, $MgSO_4$ с минимальной потерей оксидов молибдена в газовую фазу по сравнению с известными аналогами (температурный интервал термического разложения $CaCO_3$ – от 880 до 900°С, $BaCO_3$ – 950°С), и по эффективности данные сырьевые добавки природного происхождения на основе магния не уступают использованию чистых оксидов магния, кальция и бария.

Библиографический список

1. Зеликман А.Н., Меерсон Г.А. Металлургия редких металлов. М.: Металлургия, 1973. 608 с.
2. Vizsloyi A, Peters E. Nitricacid leaching of molybdenite concentrates // Hydrometallurgy. 1980. Vol. 6. No 1. P. 103–119.
3. Ashraf M. Amer. Hydrometallurgical recovery of molybdenum from Egyptian Qattar molybdenite concentrate // Physicochemical problems of mineral processing. 2011. Vol. 47. P. 105–112.
4. Mingyu Wang, Bianfang Chen, Sheng Huang, Haoxiang Yang, Bin Hu, Changda Zhang, et al. Extraction of molybdenum and nickel from Ni-Mo ore by acid leaching combined with chlorate oxidation and phosphate complexation // Minerals Engineering. 2018. Vol. 124. P. 63–67. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089268751830222X?via%3Dihub (17.04.2018). https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.020
5. Weiping Liu, Hui Xu, Xiyun Yang, Xichang Shi. Extraction of molybdenum from low-grade Ni–Mo ore in

sodium hypochlorite solution under mechanical activation // Minerals Engineering, 2011. Vol. 24. Issue 14. P. 1580–1585. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687511002895?via%3Dihub (17.04.2018). https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.08.010
6. Mingshuang Wang, Chang Wei, Gang Fan, Minting Li, Zhigan Deng, Sifu Wang. Selective extraction of Mo from a Ni–Mo ore using pressure alkaline leaching // Hydrometallurgy. 2015. Vol. 153. P. 6–11. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X15000225?via%3Dihub (19.04.2018). https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.01.008
7. Norris P.R., Burton N.P., Clark D.A. Mineral sulfide concentrate leaching in high temperature bioreactors // Minerals Engineering. 2013. Vol. 48. P. 10–19. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687513000034?via%3Dihub (19.04.2018). https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.01.001
8. Abdollahi H., Noaparast M., Shafaei S.Z., Akcil A., Panda S., Kashi M.H., et al. Prediction and optimization studies for bioleaching of molybdenite concentrate using artificial neural networks and genetic algorithm // Minerals Engineering. 2019. Vol. 130. P. 24–35. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687518304485?via%3Dihub (15.04.2018). https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.10.008
9. Juan Yu, Hong-Ying Yang, Lin-Lin Tong, Jun Zhu. Intensified bioleaching of low-grade molybdenite concentrate by ferrous sulfate and pyrite // Rare Metals. 2015. Vol. 34. Issue 3. P. 207–214. [Электронный ресурс]. URL: https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12598-014-0437-6 (19.04.2018). https://doi.org/10.1007/s12598-014-0437-6
10. Du-chao Zhang, Tian-zu Yang, Wei-feng Liu, Jianghua Wu. Pressure leaching of bismuth sulfide concentrate containing molybdenum and tungsten in alkaline solution // Journal of Central South University. 2012. Vol. 19. Issue 12. P. 3390–3395. [Электронный ресурс]. URL: https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11771-012-1419-1 (25.04.2018). https://doi.org/10.1007/s11771-012-1419-1
11. Пат. № 2529142, Российская Федерация, C22B 34/34, C22B 3/04, C22B 7/00. Способ извлечения молибдена из техногенных минеральных образований / А.Г. Секисов, В.А. Хакулов, Ю.И. Рубцов, А.Ю. Лавров, Д.В. Монзырев, К.С. Смолич; заявитель и патентообладатель Забайкальский государственный университет. Заявл. 20.02.2013; опубл. 27.09.2014. Бюл. № 27.
12. Пат. № 2393253, Российская Федерация, C22B 34/34, C22B 1/04. Способ переработки сульфидных и смешанных молибденсодержащих концентратов для извлечения молибдена, и рения / Н.А. Ватолин, Е.А. Зеленин, В.Г. Лобанов, Б.Д. Халезов; заявитель и патентообладатель Институт металлургии Уральского отделения РАН. Заявл. 08.06.2009; опубл. 27.06.2010. Бюл. № 18.
13. Ping Wang, Yajing Pan, Xiao Sun, Yongqiang Zhang. Leaching molybdenum from a low-grade roasted molybdenite concentrate // SN Applied Sciences. 2019. Vol. 1. P. 311. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0326-6
14. Харин Е.И., Халезов Б.Д., Зеленин Е.А. Разработка экологически чистой комплексной технологии переработки молибденового концентрата Южно-Шамейского месторождения // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2015. № 5. С. 129–134.
15. Gudkova I.Y., Vusikhis A.S., Lempert D.B. Oxidative roasting of molybdenite concentrate with formation of calcium molybdate carried out in the mode of filtration combustion // Russian Chemical Bulletin. 2016. Vol. 65. Issue 10. P. 2396–2399. https://doi.org/10.1007/s11172-016-1595-5
16. Singh S., Chetty M.K., Jineja J.M., Sehra J.S., Gupta C.K. Studies on the processing of low grade molybdenite concentrate by lime roasting // Minerals Engineering. 1988. Vol. 1. Issue 4. P. 337–342. https://doi.org/10.1016/0892-6875(88)90023-4
17. Aleksandrov P.V., Medvedev A.S., Milavanov M.F., Imideev V.A., Kotova S.A., Moskvitin D.O. Molybdenum recovery from molybdenite concentrates by low-temperature roasting with sodium chloride // International Journal of Mineral Processing. 2017. Vol. 161. P. 13–20. https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.02.007
18. Пат. № 2281914, Российская Федерация, C01G 39/02, C01G 39/06, C22B 1/04. Способ переработки молибденсодержащего сырья / А.И. Баев, И.В. Бакин, С.Л. Ленев, Т.П. Сирина, В.В. Храмцов; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Октагон». Заявл. 05.04.2005; опубл. 20.08.2008. Бюл. № 23.
19. Kar B.B., Murthy B.V.R., Misra V.N. Extraction molybdenum from spent catalyst by salt-roasting // International Journal of Mineral Processing. 2005. Vol. 76. P. 143–147. https://doi.org/10.1016/j.minpro.2004.08.017
20. Бахтерев В.В. Комплексный термический анализ брусита // Уральский геофизический вестник. 2018. № 1. С. 15–23. https://doi.org/10.25698/UGV.2018.1.2.15
21. Митина Н.А., Лотов В.А. Исследование изменения фазового состава, свойств и гидравлической активности при термической обработке магнезиальных материалов // Новые огнеупоры. 2017. № 6. С. 53–59. https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-6-53-59
22. Хомоксонова Д.П., Кашкак Е.С., Антропова И.Г. Совершенствование окислительного обжига молибденитового концентрата с добавкой магнезита // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 130–135. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20180214
23. Khomoksonova D.P., Budaeva A.D., Antropova I.G. Thermochemical decomposition of molybdenum concentrates with usage of magnesium-containing addi-

tives of natural origin // Earth and Environmental Science: IOP Conference Series. 2019. Vol. 320. No. 1. P. 012033 [Электронный ресурс]. URL: https:// iop-science.iop.org/article/10.1088/1755-1315/320/1/012033/pdf (25.04.2018). https://doi.org/10.1088/1755-1315/320/1/012033

References

1. Zelikman AN, Meerson GA. *Metallurgiya redkih metallov* = Metallurgy of rare metals. Moscow: Metallurgy; 1973. 608 p. (In Russ.)
2. Vizsloyi A, Peters E. Nitricacid leaching of molybdenite concentrates. *Hydrometallurgy*. 1980;6(1):103–119.
3. Ashraf M Amer. Hydrometallurgical recovery of molybdenum from Egyptian Qattar molybdenite concentrate. *Physicochemical problems of mineral processing*. 2011;47:105–112.
4. Mingyu Wang, Bianfang Chen, Sheng Huang, Haoxiang Yang, Bin Hu, Changda Zhang, et al. Extraction of molybdenum and nickel from Ni-Mo ore by acid leaching combined with chlorate oxidation and phosphate complexation. *Minerals Engineering*. 2018;124:63–67. Available from: https://www. sciencedirect.com/science/article/pii/S089268751830222X?via%3Dihub [Accessed 17th April 2018]. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.020
5. Weiping Liu, Hui Xu, Xiyun Yang, Xichang Shi. Extraction of molybdenum from low-grade Ni–Mo ore in sodium hypochlorite solution under mechanical activation. *Minerals Engineering.* 2011;24(14):1580–1585. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687511002895?via%3Dihub [Accessed 18th April 2018]. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.08.010
6. Mingshuang Wang, Chang Wei, Gang Fan, Minting Li, Zhigan Deng, Sifu Wang. Selective extraction of Mo from a Ni–Mo ore using pressure alkaline leaching. *Hydrometallurgy*. 2015;153:6–11. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X15000225?via%3Dihub [Accessed 19th April 2018]. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.01.008
7. Norris PR, Burton NP, Clark DA. Mineral sulfide concentrate leaching in high temperature bioreactors. *Minerals Engineering.* 2013;48:10–19. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687513000034?via%3Dihub [Accessed 19th April 2018]. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.01.001
8. Abdollahi H, Noaparast M, Shafaei SZ, Akcil A, Panda S, Kashi MH, et al. Prediction and optimization studies for bioleaching of molybdenite concentrate using artificial neural networks and genetic algorithm. *Minerals Engineering.* 2019;130:24–35. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687518304485?via%3Dihub [Accessed 15th April 2018]. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.10.008
9. Juan Yu, Hong-Ying Yang, Lin-Lin Tong, Jun Zhu. Intensified bioleaching of low-grade molybdenite concentrate by ferrous sulfate and pyrite. *Rare Metals.* 2015;34(3):207-214. Available from: https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12598-014-0437-6 [Accessed 19th April 2018]. https://doi.org/10.1007/s12598-014-0437-6
10. Du-chao Zhang, Tian-zu Yang, Wei-feng Liu, Jianghua Wu. Pressure leaching of bismuth sulfide concentrate containing molybdenum and tungsten in alkaline solution. *Journal of Central South University.* 2012;19(12):3390–3395. Available from: https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11771-012-1419-1 [Accessed 25th April 2018]. https://doi.org/10.1007/s11771-012-1419-1
11. Sekisov AG, Khakulov VA, Rubtsov YuI, Lavrov AYu, Monzyrev DV, Smolich KS. *Method of molybdenum extraction from technogenic mineral formations*. Patent RF, no. 2529142; 2014. (In Russ.)
12. Vatolin NA, Zelenin EA, Lobanov VG, Khalezov BD. *Processing method of sulfide and mixed molybdenum-containing concentrates for molybdenum and rhenium extraction*. Patent RF, no. 2393253; 2010. (In Russ.)
13. Ping Wang, Yajing Pan, Xiao Sun, Yongqiang Zhang. Leaching molybdenum from a low-grade roasted molybdenite concentrate. *SN Applied Sciences.* 2019;1:311. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0326-6
14. Harin EI, Halezov BD, Zelenin EA. The development of environmentally friendly complex technology of molybdenic concentrate processing at South-Shameisky field. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* = News of the Higher Institutions. Mining Journal. 2015;5:129–134. (In Russ.)
15. Gudkova IY, Vusikhis AS, Lempert DB. Oxidative roasting of molybdenite concentrate with formation of calcium molybdate carried out in the mode of filtration combustion. *Russian Chemical Bulletin*. 2016;65(10):2396–2399. https://doi.org/10.1007/s11172-016-1595-5
16. Singh S, Chetty MK, Jineja JM, Sehra JS, Gupta CK. Studies on the processing of low grade molybdenite concentrate by lime roasting. *Minerals Engineering.* 1988;1(4):337–342. https://doi.org/10.1016/0892-6875(88)90023-4
17. Aleksandrov PV, Medvedev AS, Milavanov MF, Imideev VA, Kotova SA, Moskvitin DO. Molybdenum recovery from molybdenite concentrates by low-temperature roasting with sodium chloride. *International Journal of Mineral Processing.* 2017;161:13–20. https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.02.007
18. Baev AI, Bakin IV, Lenev SL, Sirina TP, Khramtsov VV. *Processing method for molybdenum-containing raw materials*. Patent RF, no. 2281914; 2008. (In Russ.)
19. Kar BB, Murthy BVR, Misra VN. Extraction molybdenum from spent catalyst by salt-roasting. *International Journal of Mineral Processing*. 2005;76:143–147. https://doi.org/10.1016/j.minpro.2004.08.017
20. Bakhterev VV. Complex thermal analysis of brucite. *Ural'skii geofizicheskii vestnik* = Ural Geophysical Bulletin. 2018;1:15–23. (In Russ.)

https://doi.org/10.25698/UGV.2018.1.2.15
21. Mitina NA, Lotov VA. The investigation of the phase composition, properties and hydraulic activity changing under the magnesia materials' heat treatment. *Novye ogneupory* = New Refractories, 2017;6:53–59. (In Russ.) https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-6-53-59
22. Khomoksonova DP, Kashkak ES, Antropova IG. Improvement of Oxidizing Roasting of Molybdenite Concentrate by Addition of Magnesite. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* = Journal of Mining Science. 2018;2:130–135. (In Russ.) https://doi.org/10.15372/FTPRPI20180214
23. Khomoksonova DP, Budaeva AD, Antropova IG. Thermochemical decomposition of molybdenum concentrates with usage of magnesium-containing additives of natural origin. *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2019, vol. 320, no. 1, p. 012033. Available from: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/320/1/012033/pdf [Accessed 25th April 2018]. https://doi.org/10.1088/1755-1315/320/1/012033

Критерии авторства

Хомоксонова Д.П., Антропова И.Г. 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

Khomoksonova D.P., Antropova I.G. 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

Хомоксонова Дарья Петровна,
инженер лаборатории химии и технологии природного сырья,
Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия;
✉ e-mail: darkhom@mail.ru

Антропова Инна Германовна,
кандидат технических наук,
заведующая лабораторией химии и технологии природного сырья,
Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия;
e-mail: inan@binm.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Daria P. Khomoksonova,
Engineer of the Laboratory of Chemistry and Technology of Natural Raw Materials,
Baikal Institute of Nature Management,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6, Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia;
✉ e-mail: darkhom@mail.ru

Inna G. Antropova,
Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Laboratory of Chemistry and Technology of Natural Raw Materials,
Baikal Institute of Nature Management,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6, Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia;
e-mail: inan@binm.ru

СПАСИБО РЕЦЕНЗЕНТАМ:

Айзенбергу И.И., к.т.н.,
Арсентьеву О.В, к.т.н.,
Аршинову С.А., к.т.н.,
Афанасенко А.С., к.т.н.,
Бельскому С.С., к.т.н.,
Буйнову Н.Е., к.т.н.,
Висящеву А.Н., к.т.н.,
Воропаю Н.И., д.т.н., член-корр. РАН,
Герасимовой Н.П., к.т.н.,
Герасимову Д.О., к.т.н.,
Дунаеву М.П., д.т.н.,
Жмуровой В.В., к.т.н.,
Зайдесу С.А., д.т.н.,
Закарюкину В.П., д.т.н.,
Каратаевской В.М., к.т.н.,
Ковалёву Г.Ф., д.т.н..
Кольцову В.П., д.т.н.,
Константинову Г.Г., к.т.н.,
Крупенёву Д.С., к.т.н.,
Крюкову А.В., д.т.н, академику Российской академии транспорта, член-корр. АН ВШ РФ и Российской инженерной академии, заслуженному энергетику Республики Бурятия,
Кудряшову А.Н., к.т.н.,
Кузнецову Н.К., д.т.н.,
Кузьминой М.Ю., к.т.н.,
Кузьмину М.П., к.т.н.,
Лонцих П.А., д.т.н.,
Минеевой Т.С., к.т.н.,
Наумову И.В., д.т.н.,
Немчиновой Н.В., д.т.н.,
Новожилову М.А., к.т.н.,
Панасецкому Д.А., к.т.н.,
Пашкову А.Е., д.т.н.,
Пионкевичу В.А., к.т.н.,
Портнягину Е.М., к.т.н.,
Савилову А.В., к.т.н.,
Свинину В.М., д.т.н.,
Суслову К.В., к.т.н.,
Сушко С.Н., к.т.н.,
Тюменцеву В.А., к.т.н.,
Тютрину А.А, к.т.н.,
Федосову Д.С., к.т.н.,
Федчишину В.В., к.т.н.,
Черепанову А.В., к.т.н.

Спасибо за время, уделенное работе над статьями, и полезные замечания. Ваши усилия повышают уровень опубликованных материалов и делают возможным существование научного журнала.

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
№ 6 (149) 2019

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 30.12.2019 г. Формат 60x90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 26,5.
Тираж 500 экз. Заказ 264. 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, 2019