

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

iPolytech Journal

Tom 26, № 3. 2022 / Vol. 26, № 3. 2022

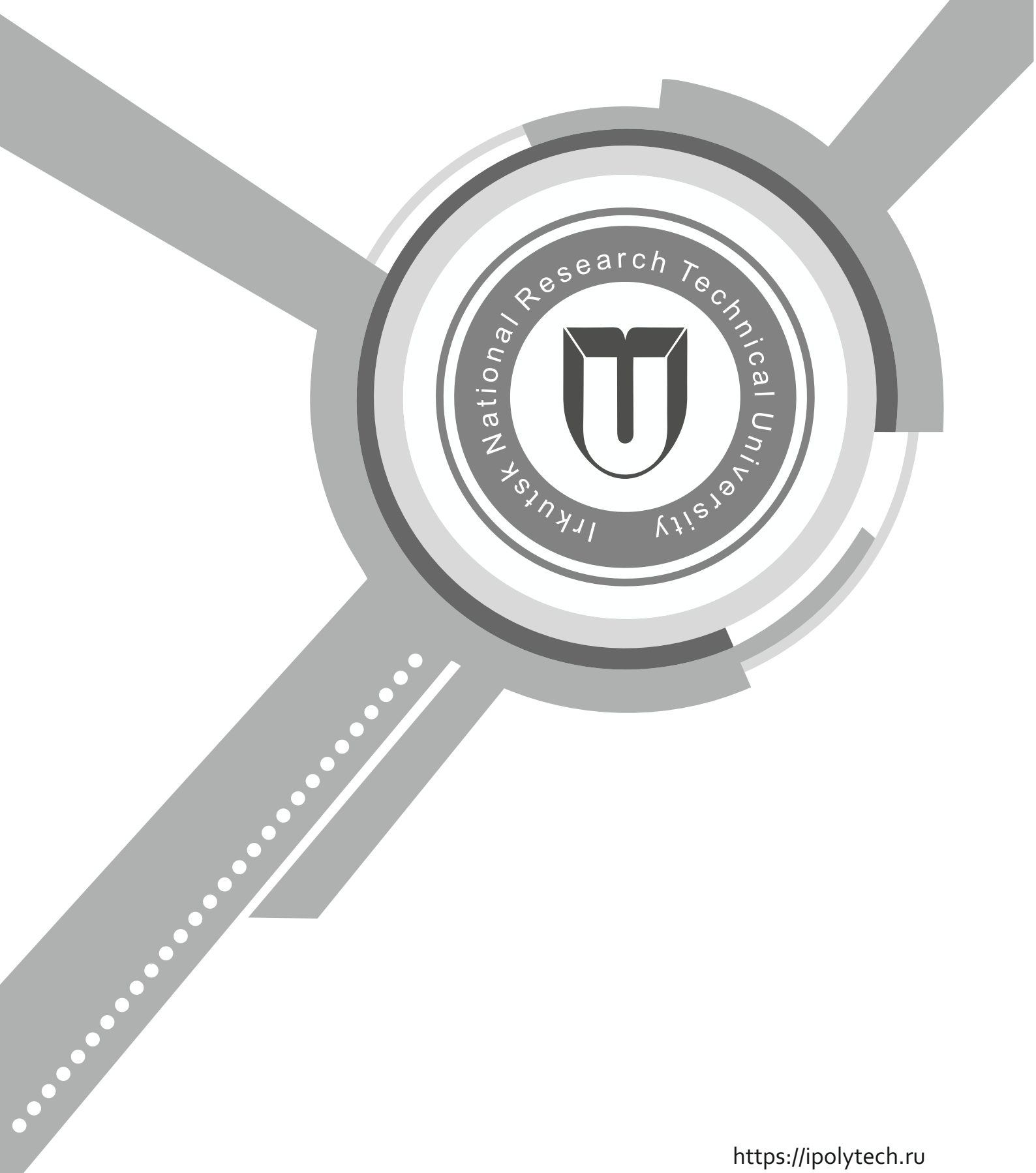


<https://ipolytech.ru>

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

iPolytech Journal

Tom 26, № 3. 2022 / Vol. 26, № 3. 2022



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

iPolytech Journal

Том 26, № 3. 2022 / Vol. 26, № 3. 2022



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Издательство
Иркутского национального исследовательского
технического университета

Периодичность издания – 4 раза в год

Учредитель:
Иркутский национальный исследовательский
технический университет

Подписной индекс в ООО «Урал-Пресс» - 41476
Адрес ООО «Урал-Пресс»:
620026, Свердловская область, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, д. 130

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

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

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

iPolytech Journal

Tom 26, № 3. 2022 / Vol. 26, № 3. 2022

SCIENTIFIC JOURNAL

Publishers
of Irkutsk National Research
Technical University

Frequency of publication – 4 times a year

Founder:
Irkutsk National Research
Technical University

The subscription code in Ural-Press LLC: 41476
The postal address of Ural-Press LLC:
130 Mamin-Sibiriyak st.,
Yekaterinburg, 620026, Russia

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

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



Редакционная коллегия

- СИДОРОВ Д.Н.**, д. ф.-м. н., профессор, профессор РАН, главный научный сотрудник, ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А.Мелентьева СО РАН (г. Иркутск)
- КОРНЯКОВ М.В.**, д.т.н., ректор Иркутского национального исследовательского технического университета, председатель редакционной коллегии (г. Иркутск, Россия)
- ЗАЙДЕС С.А.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Машиностроение» (г. Иркутск, Россия)
- НЕМЧИНОВА Н.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Металлургия» (г. Иркутск, Россия)
- СУСЛОВ К.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Энергетика» (г. Иркутск, Россия)
- БАЖИН В.Ю.**, д.т.н., заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Санкт-Петербургского горного университета (г. Санкт - Петербург, Россия)
- БЛОМЕНШТЕЙН В.Ю.**, д.т.н., профессор Кузбасского государственного технического университета (г. Кемерово, Россия)
- БОЛДЫРЕВ А.И.**, д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия)
- БОРОВИКОВ Ю.С.**, д.т.н., и.о. ректора Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого (г. Великий Новгород, Россия)
- ГАВЛИК ЮЗЕФ**, профессор кафедры технологии производства и автоматизации Краковского технологического университета (г. Краков, Польша)
- ИЛЮШИН П.В.**, д.т.н., главный научный сотрудник ФГБУН "Институт энергетических исследований Российской академии наук", Руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики
- КАРПЕНКО Е.И.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой лаборатории плазменно-энергетических процессов и технологий Института физического материаловедения СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)
- КЛЕР А.М.**, д.т.н., главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- КОЛОСОК И.Н.**, д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- КРЮКОВ А.В.**, д.т.н., академик Российской академии транспорта, член-корр. АН ВШ РФ и Российской инженерной академии, заслуженный энергетик Республики Бурятия, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия)
- КУРБАЦКИЙ В.Г.**, д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- ЛИХИ Пол**, профессор кафедры ветроэнергетики, Университетский колледж Корка, исследователь, Центр морских, климатических и энергетических исследований Ирландского научного фонда MAREI (г. Корк, Ирландия)
- МАМЯЧЕНКОВ С.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Уральского Федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)
- МАРЧУК И.В.**, д.ф.-м. н., профессор РАН, декан Механико-математического факультета Новосибирского государственного университета (г. Новосибирск, Россия)
- МАТЛИН М.М.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой деталей машин и подъемно-транспортных устройств Волгоградского государственного технического университета (г.Волгоград, Россия)
- МЫМРИН В.А.**, д.г.-м.н., профессор, Федеральный университет штата Парана (Куритиба, Бразилия)
- НОВИЦКИЙ Н.Н.**, д.т.н., главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- ОГАР П.М.**, д.т.н., профессор Братского государственного университета (г. Братск, Россия)
- ПАЗДЕРИН А.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электрических систем Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)
- ПАНТЕЛЕЕВ В.И.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электрических комплексов и систем Сибирского федерального университета (г. Красноярск, Россия)
- РАШИДИ Мохаммад Мехди**, доктор, профессор Университета Тунцзи (Шанхай, Китай)
- СЕНДЕРОВ С.М.**, д.т.н., заместитель директора Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- СТЕННИКОВ В.А.**, д.т.н., 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)
- ФАНГ ЛЮ**, профессор Центрального Южного Университета (Чанша, провинция Хунань, Китай)
- ХЕЙФЕЦ М.Л.**, д.т.н., директор Государственного научного учреждения «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси» (г. Минск, Республика Беларусь)
- ФИШОВ А.Г.**, д.т.н., профессор Новосибирского государственного технического университета (г. Новосибирск, Россия)
- ШОЛЬТЕС Бертольд**, директор Института металловедения Кассельского университета (г. Кассель, Германия)

Editorial board

- Denis N. SIDOROV**, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Advanced Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Mikhail V. KORNIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University, chairman of the editorial board (Irkutsk, Russia)
- Semen A. ZAIDES**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Machine Building Technologies and Materials, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
- Nina V. NEMCHINOVA**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)
- Konstantin V. SUSLOV**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Deputy editor-in-chief in Power Engineering (Irkutsk, Russia)
- Vladimir Yu. BAZHIN**, Dr. Sci. (Eng.), Dean of the Mineral Resources Processing Faculty, Saint Petersburg Mining University (Saint Petersburg, Russia)
- Valery Yu. BLUMENSTEIN**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Kuzbass State Technical University (Kemerovo, Russia)
- Aleksander I. BOLDYREV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)
- Yury S. BOROVNIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Novgorod State University n.a. Yaroslav-the-Wise (Veliky Novgorod, Russia)
- Josef GAVLIK**, Advanced Professor, Department of Production Technology and Automation, Krakow University of Technology (Krakow, Poland)
- PAVEL V. ILYUSHIN**, Doctor of Sciences (Engineering), Chief Researcher, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Head of the Center for Intelligent Electric Power Systems and Distributed Energy
- Evgeniy I. KARPENKO**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of the Laboratory of Plasma Energy Processes and Technologies, Institute of Physical Materials Science, SB RAS (Ulan-Ude, Russia)
- Aleksander M. KLER**, Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Irina N. KOLOSOK**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Andrey V. KRYUKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Transport, Corresponding member of the Academy of Sciences, Higher School of the Russian Federation and the Russian Academy of Engineering, Honored Power Engineer of the Republic of Buryatia, Advanced Professor, Department of Transport Electric Power Industry, Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)
- Viktor G. KURBATSKY**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Paul LEAHY**, Professor at University College Cork (Department of Wind Power); Funded Investigator in the Science Foundation Ireland MAREI Centre for Marine, Climate and Energy research (Cork, Ireland)
- Sergey V. MAMYACHENKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Nonferrous Metallurgy, Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russia)
- Igor V. Marchuk**, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Director of the Mechanics and Mathematics Department, Novosibirsk State University (Russia)
- Mikhail M. MATLIN**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Machine Parts and Hoisting-and-Transport Devices, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)
- Vsevolod A. MYMRIN**, Dr. Sci. (Geology), Professor, Federal University of Parana (Curitiba, Brazil)
- Nikolay N. NOVITSKY**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Pyotr M. OGAR**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Bratsk State University (Bratsk, Russia)
- Andrey V. PAZDERIN**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automated Electric Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)
- Vasily I. PANTELEEV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Electrical Systems, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)
- Mohammad Mehdi RASHIDI**, Professor Tongji University, (China)
- Sergey M. SENDEROV**, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Valery A. STENNIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Director, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Zbigniew A. STYCZYNSKI**, Professor, Otto-von-Guericke University (Magdeburg, Germany)
- Liu FANG**, Professor, Central Southern University (Changsha, Hunan Province, China)
- Mikhail L. KHEIFETS**, Dr. Sci. (Eng.), Director, Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)
- Aleksander G. FISHOV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia)
- Berholt SCHOLTES**, Director, Institute of Metal Science, University of Kassel (Kassel, Germany)



Содержание 364

Машиностроение

- Елисеев А. В., Кузнецов Н. К.** Технология структурного математического моделирования технических объектов в условиях вибрационного нагружения: формы взаимодействий и динамические инварианты..... 368
- Шеметов Л. И., Распопина В. Б., Чернышков А. С.** Трансформация геометрии образца для механических испытаний конструкционных материалов в FDM-структуре..... 386

Энергетика

- Анненков Е. О., Зубова Е. В., Селезнев А. С., Федосов Д. С.** Оценка эффективности метода двух измерений при определении параметров схем замещения элементов электрической сети для высших гармонических составляющих токов и напряжений..... 401
- Ачитаев А. А., Носков М. Ф., Валецкая А. И., Татарников В. И.** Применение адаптивного регулятора скорости вращения гидрогенератора с учетом технологического состояния турбины Каплана..... 415
- Забуга Ф. В., Алексеюк В. Э.** Оценка модернизации схемы основного конденсата энергоблока № 5 ТЭЦ-10 С применением его настроенной математической модели..... 426
- Коновалов Ю. В., Хазиев А. Н.** Расчет инсоляции солнечной фотоэлектрической электростанции с учетом геолокационных и погодных параметров..... 439
- Нефедов А. С., Шакиров В. А., Игнатьева С. М.** Многокритериальный выбор структуры генерирующих мощностей локальных энергосистем на основе модифицированного метода анализа иерархий..... 451
- Рудник В. Е., Суворов А. А., Рубан Н. Ю., Андреев М. В., Бай Ю. Д.** Исследование функционирования алгоритма синтетической инерции в электроэнергетических системах разной плотности..... 465
- Сергеев Н. Н., Матренин П. В.** Повышение точности прогноза электропотребления промышленного предприятия методами машинного обучения с помощью отбора значимых признаков из временного ряда..... 487
- Скиданов М. А., Папин В. В., Безуглов Р. В., Дьяконов Е. М., Ефимов Н. Н., Филимонов В. Р.** Анализ влияния подогрева воздуха перед компрессором газотурбинной установки на технико-экономические показатели работы блока ПГУ-450..... 499
- Тигунцев С. Г., Ахмедов С. Б., Усмонов С. Б.** Разработка мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях Наманганской области Республики Узбекистан..... 508
- Троценко В. М., Гиршин С. С., Петрова Е. В., Сидоров О. А., Румянцева Е. В., Жиленко Е. П., Горюнов В. Н.** Математическая модель теплового режима воздушной линии электропередачи с учетом изменения температуры по длине..... 519

Металлургия

- Бажин В. Ю., Нгуен Хю Хоанг.** Идентификация короткого замыкания электродов по тепловому излучению при электролитическом рафинировании меди..... 532
- Каримова Л. М., Аргын А.** Исследования по экстракции меди реагентом Acorga M5774 из растворов кучного выщелачивания месторождения Саяк..... 545
- Тимофеев А. А., Данькина Г. Б., Пискажова Т. В., Колмакова Л. П.** Виртуализация трубчатого выщелачивателя при производстве глинозема..... 554

Персоналия

- Профессор Виктор Владимирович Ёлшин: научный деятель, педагог..... 566

Content	365
<hr/>	
Mechanical engineering	
<hr/>	
Eliseev A. V., Kuznetsov N. K. A technology of structural mathematical modelling for engineering objects under vibrational loading: Interaction forms and dynamic invariants.....	368
Shemetov L. I., Raspopina V. B., Chernyshkov A. S. Sample geometry transformation for mechanical tests of constructional materials in an FDM structure.....	386
<hr/>	
Energy industry	
<hr/>	
Annenkov E. O., Zubova E. V., Seleznev A. S., Fedosov D. S. Effectiveness of the method of two measurements in determining the parameters of equivalent circuits of electrical network elements for the highest harmonic components of currents and voltages.....	401
Achitaev A. A., Noskov M. F., Valetskaya A. I., Tatarnikov V. I. Application of an adaptive controller for controlling the rotational velocity of hydrogenerators taking into account the technological state of a Kaplan turbine.....	415
Zabuga F. V., Alekseyuk V. E. Evaluation of a modernization project of the main condensate scheme at CHP-10 power unit No. 5 using its customized simulation model.....	426
Konovalov Yu. V., Khaziev A. N. Insolation calculations of a photovoltaic power plant taking into account location-based and weather parameters.....	439
Nefedov A. S., Shakirov V. A., Ignatieva S. M. Multi-criteria selection of the mix of generating plants in local energy systems based on a modified analytic hierarchy process.....	451
Rudnik V. E., Suvorov A. A., Ruban N. Yu., Andreev M. V., Bay Yu. D. Operation of synthetic inertia units in electric power systems of various densities.....	465
Sergeev N. N., Matrenin P. V. Increasing the accuracy of forecasting the electricity consumption of an industrial enterprise by machine learning methods using the selection of significant features from a time series.....	487
Skidanov M. A., Papin V. V., Bezuglov R. V., Dyakonov E. M., Efimov N. N., Filimonov V. R. An analysis of the effect of gas turbine compressor air preheating on the technical and economic indicators of a PGU-450 unit.....	499
Tiguntsev S. G., Akhmedov S. B., Usmonov S. B. Development of measures to reduce grid energy losses in the Namangan Region of Uzbekistan.....	508
Trotsenko V. M., Girshin S. S., Petrova E. V., Sidorov O. A., Romyantseva E. V., Zhilenko E. P., Goryunov V. N. Mathematical model of the thermal mode of overhead power lines considering temperature variations along the line length.....	519
<hr/>	
Metallurgy	
<hr/>	
Bazhin V. Yu., Nguyen Huy Hoang. Identification of electrode short circuits during the electrolytic refining of copper based on heat radiation.....	532
Karimova L. M., Argyn A. Studies into copper extraction by Acorga M5774 from heap leaching solutions of the Sayak deposit.....	545
Timofeev A. A., Danykina G. B., Piskazhova T. V., Kolmakova L. P. Virtualization of a tube digester in alumina production.....	554
<hr/>	
Personalia	
<hr/>	
Professor Viktor Vladimirovich Elshin: scientist, teacher.....	566



Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию выпуск научного журнала «iPolytech Journal».

Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Министерства науки и высшего образования РФ.

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

«iPolytech Journal» реферируется и рецензируется.

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- Машиностроение
- Энергетика
- Металлургия

Редколлегия

Dear Readers!

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

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

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

The journal "iPolytech Journal" is abstracted and reviewed.

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

- Mechanical Engineering
- Energy industry
- Metallurgy

Editorial Board



Научная статья
УДК 531.3:007, 534.014, 621.802, 62.752
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-368-385>

Технология структурного математического моделирования технических объектов в условиях вибрационного нагружения: формы взаимодействий и динамические инварианты

Андрей Владимирович Елисеев^{1✉}, Николай Константинович Кузнецов²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия,

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

¹eavsh@ya.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0222-2507>

²knik@istu.edu, <http://orcid.org/0000-0002-3083-0182>

Резюме. Цель исследования заключается в развитии системного подхода к оценке динамических форм взаимодействий элементов механических колебательных систем, используемых в качестве расчетных схем технических объектов транспортного или технологического назначения. Методологической основой исследования является структурное математическое моделирование, в рамках которого механическая колебательная система (с конечным числом степеней свободы) сопоставляется со структурной схемой эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления. Объектом исследования служит семейство механических колебательных систем с конечным числом степеней свободы, находящихся под воздействием связанных силовых гармонических возмущений. В качестве предмета исследования выступает совокупность динамических состояний технического объекта, вызванных приложением на различных частотах синфазных внешних силовых возмущений, которые характеризуются коэффициентом связности. Для семейства цепных механических колебательных систем с двумя степенями свободы разработан метод интерпретации совокупности динамических состояний в виде ориентированных графов. Разработан формальный метод построения графа совокупности динамических состояний на основе амплитудно-частотных характеристик передаточных функций системы. Показано, что в рамках разработанной интерпретации графы динамических состояний могут рассматриваться как своеобразные инварианты, сохраняющиеся на множествах параметров механических колебательных систем. На методологической базе структурного математического моделирования разработана концепция динамических инвариантов, в рамках которой совокупность динамических инвариантов может быть использована для обобщенной оценки многообразия динамических состояний и форм динамических взаимодействий элементов механических колебательных систем. Предложенная концепция динамических инвариантов расширяет методологию структурного математического моделирования применительно к задачам системного анализа обеспечения безопасности работы технических объектов транспортного и технологического назначения, находящихся в условиях связанных вибрационных нагружений.

Ключевые слова: механические колебательные системы, структурное математическое моделирование, режимы динамического гашения колебаний, динамические формы взаимодействий, динамические инварианты

Для цитирования: Елисеев А. В., Кузнецов Н. К. Технология структурного математического моделирования технических объектов в условиях вибрационного нагружения: формы взаимодействий и динамические инварианты // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 368–385. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-368-385>.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

A technology of structural mathematical modelling for engineering objects under vibrational loading: Interaction forms and dynamic invariants

Andrey V. Eliseev^{1✉}, Nikolay K. Kuznetsov²

© Елисеев А. В., Кузнецов Н. К., 2022

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia,

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

¹eavsh@ya.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0222-2507>

²knik@istu.edu, <http://orcid.org/0000-0002-3083-0182>

Abstract. We present a system approach to evaluating dynamic forms of interactions between elements of mechanical oscillatory systems, which can be applied as design diagrams of engineering objects used for transport or technology purposes. The approach of structural mathematical modelling was used, where a mechanical oscillatory system (with the finite number of freedom degrees) is compared to the block diagram of a dynamically equivalent automatic control system. The research object was represented by a family of mechanical oscillatory systems with the finite number of freedom degrees under the action of connected force harmonic disturbances. The main research focus was on a set of dynamic states of an engineering object, which are caused by the application of common-phase external force disturbances at various frequencies and characterised by a connection coefficient. For a family of chain mechanical oscillatory systems with two degrees of freedom, a method for interpreting a set of dynamic states in the form of oriented graphs was developed. A method for constructing a population graph of dynamic states based on the frequency response of system transfer functions was developed. Within the framework of the developed interpretation, the graphs of dynamic states can be considered as peculiar invariants that persist on sets of mechanical oscillatory system parameters. Using the methodology of structural mathematical modelling, a concept of dynamic invariants was developed, according to which the totality of dynamic invariants can be used to provide a general evaluation of the variety of dynamic states and forms of dynamic interactions between the elements of mechanical oscillatory systems. The proposed concept of dynamic invariants extends the methodology of structural mathematical modelling in relation to the problems of system analysis for ensuring the safety of engineering objects for transport and technology purposes under the conditions of connected vibrational loading.

Keywords: mechanical oscillatory systems, structural mathematical modeling, modes of dynamic vibration damping, dynamic forms of interactions, dynamic invariants

For citation: Eliseev A. V., Kuznetsov N. K. A technology of structural mathematical modelling for engineering objects under vibrational loading: Interaction forms and dynamic invariants. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):368-385. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-368-385>.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам безопасности работы технических объектов уделяется значительное внимание [1–3]. Требования к динамическому качеству функционирования узлов технических объектов, реализация режимов динамического гашения колебаний, необходимость настройки вибрационных полей технологических машин, особенности управления динамическими эффектами в целях повышения производительности технологических процессов предопределяют внимание к развитию методологической базы для решения широкого круга задач динамики технических объектов, находящихся в условиях вибрационных нагружений [4–9].

Методологической основой решения широкого круга задач динамики с расчетными схемами в виде механических колебательных систем служат методы структурного математического моделирования [10]. В рамках структурного математического моделирования механические колебательные системы сопоставляются со структурными схемами эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления. Для

оценки, контроля и реализации особенностей динамических взаимодействий элементов механических колебательных систем в условиях вибрационных нагружений используется понятие о динамической податливости, представляющее собой передаточное отношение, построенное на основе структурной схемы механической колебательной системы.

Методы структурного математического моделирования получили широкое распространение в решении задач вибрационной защиты и виброизоляции [11–14]. Структурное математическое моделирование нашло свое применение к решению ряда частных задач, связанных с оценкой динамических особенностей сочленений [15], дополнительных связей [16], связей, обладающих неустойчивым характером [17–18].

Определенное развитие получила методология структурного математического моделирования в направлении решения задач оценки динамических состояний и форм взаимодействий элементов технических объектов транспортного и технологического назначения [19–21].

Вместе с тем методология оценки дина-

мических состояний и форм взаимодействий элементов механических колебательных систем, находящихся под воздействием внешних возмущений, недостаточно детализирована для учета условий, отображающих связность амплитуд внешних синфазных силовых возмущений.

Статья посвящена развитию представлений о динамических формах взаимодействий элементов механических колебательных систем с двумя степенями свободы, находящихся под воздействием связанных внешних возмущений силовой природы.

МЕХАНИЧЕСКАЯ КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Рассматривается механическая колебательная система с двумя степенями свободы, образованная массоинерционными элементами m_1, m_2 , которые связаны между собой, и с опорными поверхностями с помощью упругих элементов с жесткостями k_1, k_2, k_3 (рис. 1). Под воздействием внешних гармонических синфазных силовых возмущений Q_1 и Q_2 элементы m_1, m_2 совершают малые установившиеся колебания. В качестве обобщенных координат рассматриваются смещения y_1, y_2 массоинерционных элементов m_1, m_2 относительно положения статического равновесия.

На основе формализма Лагранжа с использованием функций потенциальной и кинетической энергии вида

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 y_1^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_2 - y_1)^2 + \frac{1}{2} k_3 y_2^2, \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{2} m_1 \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{y}_2^2 \quad (2)$$

строится система дифференциальных уравнений с учетом нулевых начальных условий:

$$m_1 \ddot{y}_1 + (k_1 + k_2) y_1 - k_2 y_2 = Q_1, \quad (3)$$

$$-k_2 y_1 + m_2 \ddot{y}_2 + (k_2 + k_3) y_2 = Q_2. \quad (4)$$

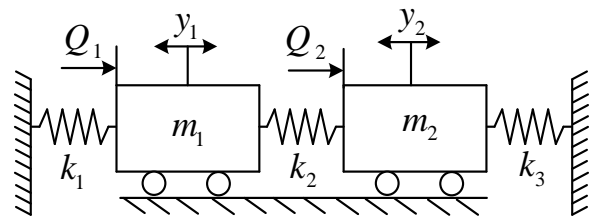


Рис. 1. Расчетная схема технического объекта
Fig. 1. Loading diagram of a technical object

Система (3)–(4) дифференциальных уравнений под действием преобразования Лапласа [22] преобразуется к системе алгебраических уравнений относительно изображений \bar{y}_1, \bar{y}_2 , рассматриваемых как функции комплексного переменного $p = j\omega$, $j = \sqrt{-1}$:

$$(m_1 p^2 + k_1 + k_2) \bar{y}_1 - k_2 \bar{y}_2 = \bar{Q}_1; \quad (5)$$

$$-k_2 \bar{y}_1 + (m_2 p^2 + k_2 + k_3) \bar{y}_2 = \bar{Q}_2. \quad (6)$$

На основе известных методов [10, 21] алгебраическую систему (5)–(6) сопоставляют со структурной схемой эквивалентной в динамическом отношении системой автоматического управления (рис. 2).

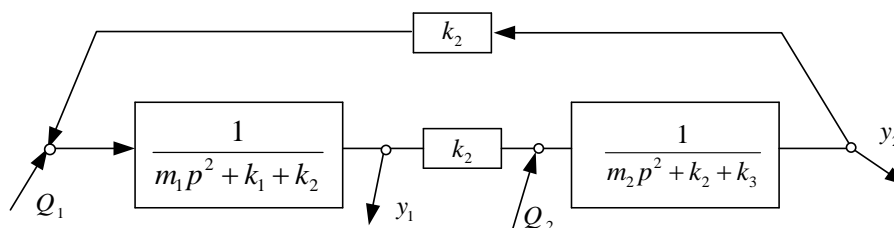


Рис. 2. Структурная схема механической колебательной системы на рис. 1
Fig. 2. Block diagram of a mechanical oscillatory system in Fig. 1

Объектом, динамическое состояние которого оценивается, выбран маcсоинерционный элемент m_1 с координатой y_1 . При условии, что внешнее силовое воздействие Q_1 приложено к маcсоинерционному элементу m_1 ($Q_1 \neq 0, Q_2 = 0$), особенности динамических взаимодействий объекта могут быть выражены передаточной функцией системы в виде:

$$W_{11}(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1} = \frac{m_2 p^2 + k_2 + k_3}{A(p)}, \quad (7)$$

где

$$A(p) = (m_1 p^2 + k_1 + k_2) \times (m_2 p^2 + k_2 + k_3) - k_2^2. \quad (8)$$

– характеристический многочлен.

Если объектом для оценки динамических свойств выбирается маcсоинерционный элемент m_2 с координатой y_2 , то особенности взаимодействий при условии ($Q_1 = 0, Q_2 \neq 0$) могут быть представлены передаточной функцией вида:

$$W_{22}(p) \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_2} = \frac{m_1 p^2 + k_1 + k_2}{A(p)}. \quad (9)$$

После замены $p = j\omega$ передаточная функция системы (7) может быть представлена в виде амплитудно-частотной характеристики:

$$A_{11}(\omega) = \frac{-m_2 \omega^2 + k_2 + k_3}{(-m_1 \omega^2 + k_1 + k_2)(-m_2 \omega^2 + k_2 + k_3) - k_2^2}. \quad (10)$$

Амплитудно-частотная характеристика (10) отображает совокупность таких особенностей взаимодействий объекта, как динамическое гашение колебаний (рис. 3, т. 3) и резонанс (рис. 3, т. 1 и 2). Существенные особенности динамической податливости отображаются положительными ветвями графика амплитудно-частотной характеристики (рис. 3, линия 1, линия 3), отрицательными ветвями (рис. 3, линия 2, линия 4), резонансами (рис. 3, т. 1 и 2) и режимом обнуления амплитуды колебания (рис. 3, т. 3).

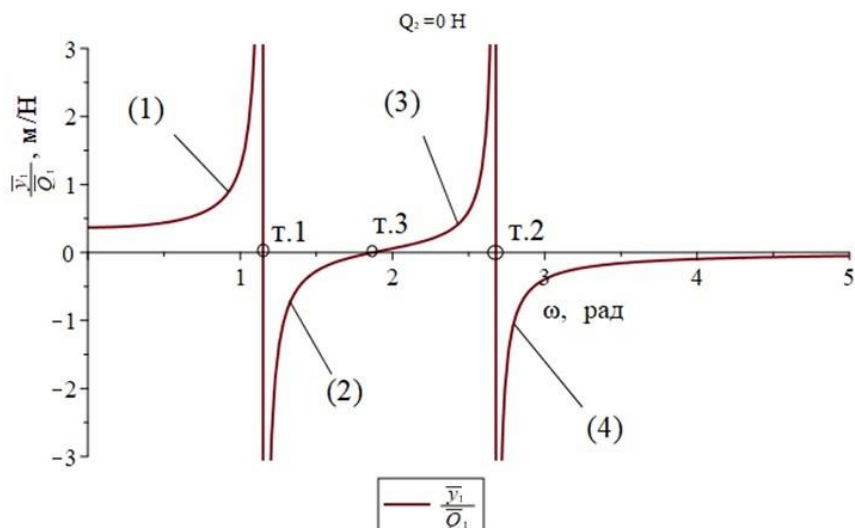


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика передаточной функции:
 1, 3 – положительные ветви графика; 2, 4 – отрицательные ветви графика;
 т. 1 – первая собственная частота ω_1 ; т. 2 – вторая собственная частота ω_2 ;
 т. 3 – частота динамического гашения колебаний ω_0

Fig. 3. Amplitude-frequency characteristic of the transfer function: 1, 3 – positive legs of the graph; 2, 4 – negative legs of the graph; p. 1 – the first natural frequency ω_1 ; p. 2 – the second natural frequency ω_2 ; p. 3 – the frequency of dynamic damping of oscillations ω_0

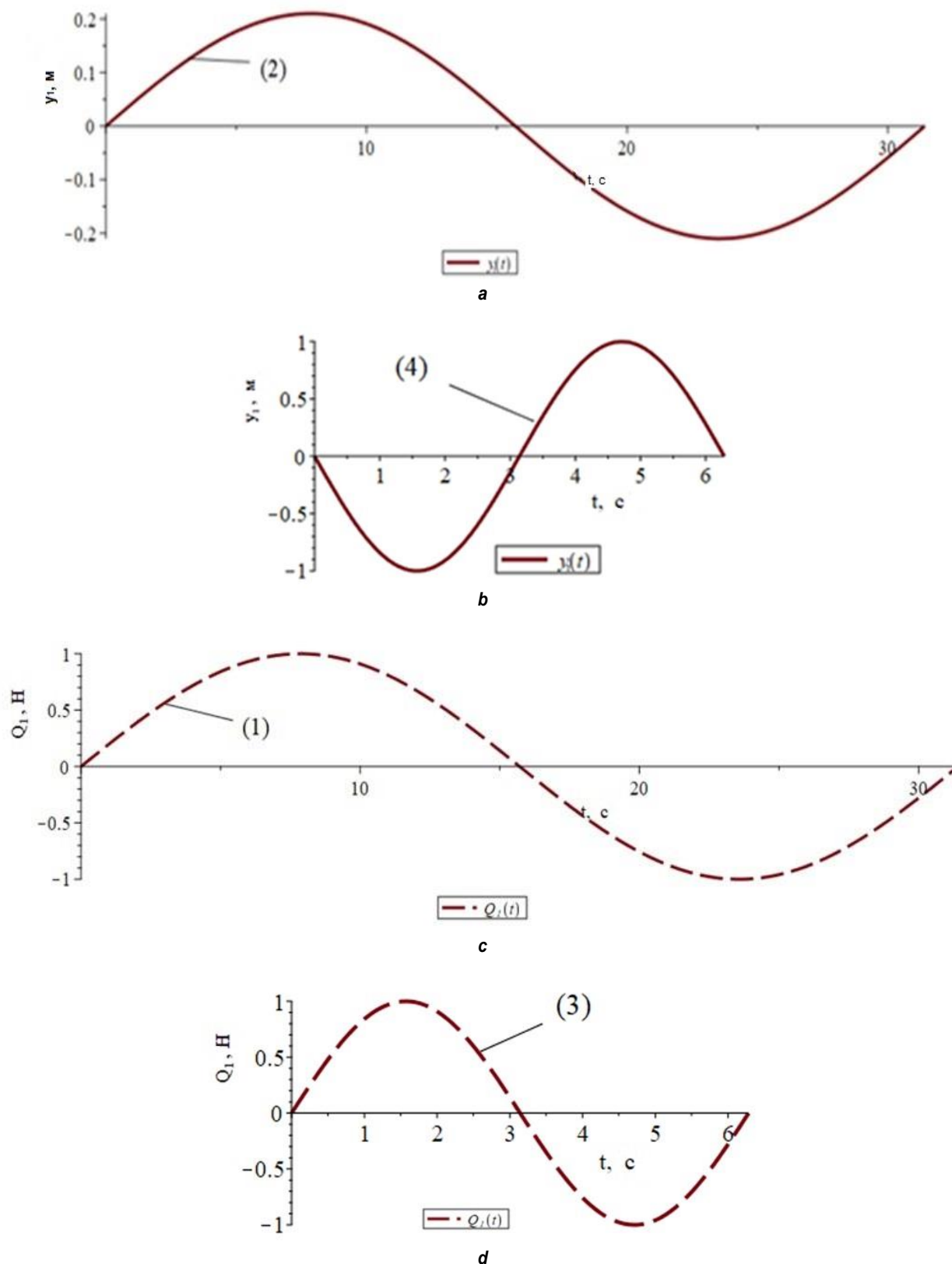


Рис. 4. Формы динамических взаимодействий объекта: а, с – «положительная» форма взаимодействия, 1 – график внешнего возмущения Q_1 на частоте $\omega = 1$ рад/с, 2 – график смещения координаты y_1 ; б, d – «отрицательная» форма взаимодействия, 3 – график внешнего возмущения Q_1 на частоте $\omega = 0,2$ рад/с, 4 – график смещения координаты y_1

Fig. 4. Forms of dynamic interactions of the object: a, c – 'positive' interaction form, 1 – graph of the external disturbance Q_1 at the frequency of $\omega = 1$ rad/s, 2 – graph of the y_1 coordinate displacement; b, d – 'negative' interaction form, 3 – graph of the external disturbance Q_1 at the frequency of $\omega = 0.2$ rad/s, 4 – graph of the y_1 coordinate displacement

Совокупности динамических особенностей, представленных амплитудно-частотной характеристикой (см. рис. 3), могут быть отображены с помощью ориентированных графов [23, 24].

Форма динамического взаимодействия объекта считается «положительной», если направленности движения элемента в виде синусоиды (рис. 4 а) совпадают с направленностью, взятой за базовую, изменения внешнего силового возмущения (рис. 4 с). Форма динамического взаимодействия объекта считается «отрицательной», если направленность его движения (рис. 4 б) противоположна направленности изменений внешнего силового возмущения Q_1 (рис. 4 д).

На основе амплитудно-частотной характеристики $\bar{y}_1/\bar{Q}_1(\omega)$ (см. рис. 3) совокупность динамических форм взаимодействий объекта, рассматриваемая в границах частотного диапазона $(0, \omega_0)$, может быть представлена графом (рис. 5)

$$G = \{V, E\}, \quad (11)$$

где множество вершин $V = \{v_1, v_2\}$ отображает совокупность динамических форм взаимодействий объекта, а множество дуг $E = \{e_1\}$ отображает динамические состояния.

В частности, вершина $v_1 = \langle + \rangle$ отображает «положительную» форму взаимодействий объекта на интервале $(0, \omega_1)$, которая соответствует положительной ветви амплитудно-частотной характеристики на интервале $(0, \omega_1)$ (см. рис. 3, линия 1); вершина $v_2 = \langle - \rangle$ отображает «отрицательную» форму взаи-

модействий объекта на интервале (ω_1, ω_0) , где ω_0 – частота обнуления амплитуды колебания объекта (см. рис. 3, т. 3). Вершина v_2 соответствует отрицательной ветви амплитудно-частотной характеристики на интервале (ω_1, ω_0) (см. рис. 3, линия 2). Дуга $e_1 = \langle (v_1, v_2), \infty \rangle$; $\omega = \omega_1 >$ отображает динамическое состояние резонанса на первой собственной частоте ω_1 (см. рис. 3, т. 1).

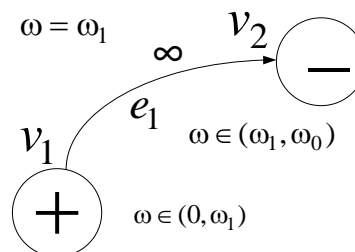


Рис. 5. Ориентированный граф $G = \{V, E\}$ динамических форм взаимодействий объекта на интервале $(0, \omega_0)$
 Fig. 5. Oriented graph $G = \{V, E\}$ of dynamic forms of object interactions on the interval $(0, \omega_0)$

Особенности динамических форм взаимодействий объекта на фиксированном частотном интервале, представленные амплитудно-частотной характеристикой (см. рис. 3), могут быть отображены ориентированным графом (см. рис. 5) в ограниченном частотном диапазоне $(0, \omega_0)$.

Для оценки всей совокупности динамических форм взаимодействий объекта на основе амплитудно-частотной характеристики (см. рис. 3) может быть построен граф $G = \{V, E\}$, взаимно-однозначно отображающий с помощью вершин динамические формы в частотной области $(0, \infty)$ (рис. 6 а).

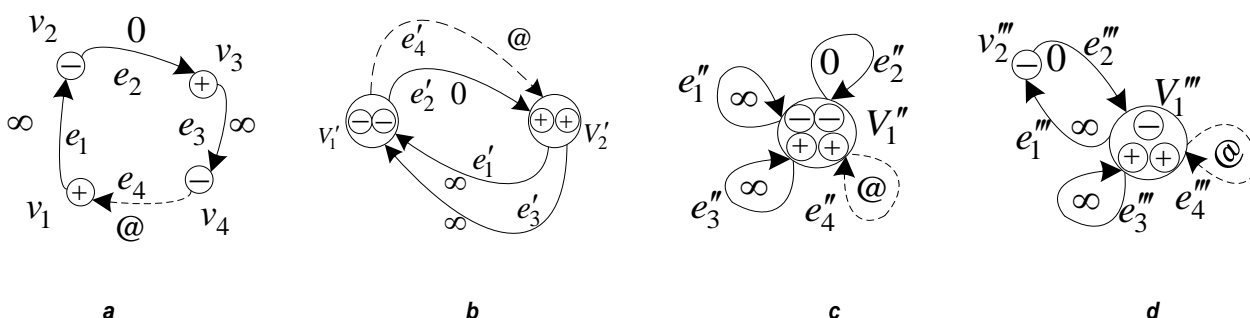


Рис. 6. Динамические формы взаимодействий объекта в виде ориентированных графов (@ – условное состояние «покоя-запирания»): а – граф $G = \{V, E\}$; б – граф $G' = \{V', E'\}$; в – граф $G'' = \{V'', E''\}$; д – граф $G''' = \{V''', E'''\}$
 Fig. 6. Dynamic forms of object interactions in the form of oriented graphs (@ – conditional rest-shutoff state): а – G graph = $\{V, E\}$; б – G' graph = $\{V', E'\}$; в – G'' graph = $\{V'', E''\}$; д – G''' graph = $\{V''', E'''\}$

Наравне с совокупностью динамических форм взаимодействий, распределенных по частотным интервалам, может быть рассмотрена совокупность динамических форм взаимодействий с обобщенной точки зрения, учитывающей только направленность движения без привязки к частотному интервалу. В рамках указанного обобщения для отображения фактически двух совокупностей динамических форм взаимодействий на основе графа G (рис. 6 а) может быть рассмотрен граф G' (рис. 6 б) путем отождествления между собой вершин одинаковой направленности. Знак «@» отображает условные, отождествленные между собой по критерию равенства нулю амплитуд колебаний, состояния обнуления или запираания амплитуды колебания по мере неограниченного роста частоты внешнего возмущения и состояние покоя системы, «предшествующее» приложению внешнего возмущения (условное состояние «покоя-запираания»).

В развитии подхода, связанного с обобщением представлений о динамических формах взаимодействий объектов механических колебательных систем, может быть рассмотрено понятие формы «как таковой» безотносительно ее направленности с целью определения наиболее обобщенных характеристик динамических форм. Для передачи представлений о динамических формах без учета их направленностей может быть построен граф $G'' = \{V'', E''\}$ (см. рис. 6 с), в котором формы одинаковых и противоположных направленностей отождествлены между собой и представлены одной вершиной.

Свойства динамической формы взаимодействий, выбранной в качестве предмета оценки из совокупности всех динамических особенностей объекта, могут быть представлены графом, в котором соответствующая динамическая форма отображена вершиной, а все остальные динамические особенности представлены одной обобщенной вершиной, петлями и связующими дугами (см. рис. 6 д).

Перераспределение между массоинерционными элементами m_1 и m_2 двух зависимых силовых возмущений Q_1 и Q_2 , приложенных к соответствующим элементам, с учетом связи в виде

$$Q_2 = \gamma Q_1, \quad (12)$$

существенным образом может измениться в зависимости от коэффициента связности $\gamma \in (-\infty, \infty)$ и совокупности динамических форм взаимодействий объекта механической колебательной системы.

Цель исследования заключается в разработке методологического подхода к оценке совокупности динамических форм взаимодействий массоинерционного элемента механической колебательной системы, находящейся под воздействием параметрического семейства внешних гармонических синфазных возмущений силовой природы.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Математическая модель. Рассматривается механическая колебательная система (см. рис. 1) с учетом зависимых внешних воздействий (12), характеризуемых коэффициентом связности γ . С учетом зависимости внешних возмущений (12) система уравнений (5) и (6) принимает вид:

$$(m_1 p^2 + k_1 + k_2) \bar{y}_1 - k_2 \bar{y}_2 = \bar{Q}_1; \quad (13)$$

$$-k_2 \bar{y}_1 + (m_2 p^2 + k_2 + k_3) \bar{y}_2 = \gamma \bar{Q}_1. \quad (14)$$

Соответствующая уравнениям (13)–(14) структурная схема (см. рис. 2) принимает вид (рис. 7), учитывающий в своем составе коэффициент связности γ внешних возмущений.

Структурная схема (см. рис. 7) может быть приведена к координате объекта, динамическое состояние которого оценивается (рис. 8).

На основе структурной схемы (см. рис. 8) для оценки динамических особенностей объекта системы с учетом коэффициента связности γ внешних воздействий может быть рассмотрена передаточная функция системы:

$$W_{11}(\gamma, p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1} = \frac{m_2 p^2 + k_2 + k_3 + \gamma k_2}{A(p)}. \quad (15)$$

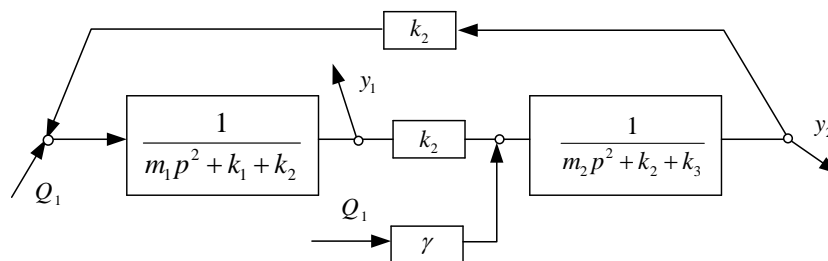


Рис. 7. Структурная схема (рис. 2) механической колебательной системы (см. рис. 1) с учетом коэффициента связности γ

Fig. 7. Block diagram (Fig. 2) of a mechanical oscillatory system (see Fig. 1) taking into account the connectivity coefficient γ

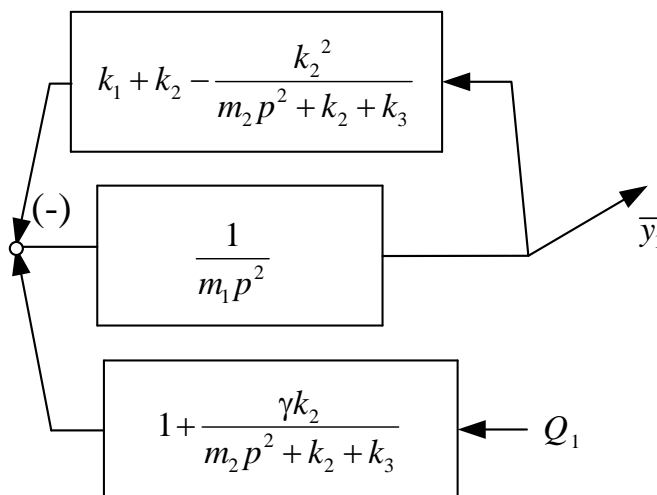


Рис. 8. Приведенная к объекту m_1 структурная схема
 Fig. 8. Block diagram reduced to the object m_1

В физическом плане при замене $p = j\omega$ где передаточное отношение (15) представляет собой податливость системы, в общем случае зависящей от частоты внешнего силового воздействия ω . Множество податливостей для всевозможных частот ω представляет собой совокупность динамических состояний и форм взаимодействий.

Формы динамических взаимодействий объекта системы с учетом связности внешних силовых возмущений. Для установления зависимости динамических форм взаимодействий от коэффициента связности внешних возмущений преобразуем характеристический многочлен (8) к виду, учитывающему явный вид парциальных частот n_1 , n_2 , и частот Δ_1 , Δ_2 отдельных фрагментов системы:

$$A(p)\Big|_{p=j\omega} = m_1 m_2 (\omega^4 - (n_1^2 + n_2^2)\omega^2 + n_1^2 n_2^2 - \Delta_1^2 \Delta_2^2), \quad (16)$$

$$n_1^2 = \frac{k_1 + k_2}{m_1}, \quad (17)$$

$$n_2^2 = \frac{k_2 + k_3}{m_2}, \quad (18)$$

$$\Delta_1^2 = \frac{k_2}{m_1}, \quad (19)$$

$$\Delta_2^2 = \frac{k_2}{m_2} \quad (20)$$

– характерные частоты системы.

В новых обозначениях n_1 , n_2 , Δ_1 , Δ_2 (17)–(20) собственные частоты системы ω_1 , ω_2 принимают следующий вид:

$$\omega_1^2 = \frac{n_1^2 + n_2^2}{2} - \sqrt{\left(\frac{n_1^2 - n_2^2}{2}\right)^2 + \Delta_1^2 \Delta_1^2}; \quad (21)$$

$$\omega_2^2 = \frac{n_1^2 + n_2^2}{2} - \sqrt{\left(\frac{n_1^2 - n_2^2}{2}\right)^2 + \Delta_1^2 \Delta_1^2}. \quad (22)$$

Передаточное отношение (15) в обозначениях (17)–(20) имеет вид:

$$W_{11}(\gamma, p) \Big|_{p=j\omega} = \frac{\bar{y}_1}{Q_1} = \frac{-m_2(\omega^2 - (n_2^2 + \gamma\Delta_2^2))}{m_1 m_2 (\omega^2 - \omega_1^2)(\omega^2 - \omega_2^2)}, \quad (23)$$

где коэффициент связности внешних воздействий γ пробегает все возможные действительные значения, т.е. $-\infty < \gamma < \infty$. Выражение $n_2^2 + \gamma\Delta_2^2$ для фиксированного коэффициента γ определяет функциональные особенности передаточного отношения (23), зависящего от

частоты внешнего возмущения ω .

Для определения совокупностей динамических особенностей объекта механической колебательной системы необходимо рассмотреть возможные варианты внешнего возмущения, характеризуемые интервалами и критическими значениями коэффициента связности γ .

1. Пусть для коэффициента связности γ выполнено условие:

$$\gamma < \gamma_0, \quad (24)$$

где $\gamma_0 = -n_2^2/\Delta_2^2$ – критическое значение, зависящее от собственных характеристик системы (17)–(20). Существенные особенности передаточного отношения (23) определяются расположением собственных частот ω_1 и ω_2 системы относительно значения выражения $\Delta_2^2\gamma + n_2^2$ (см. табл. 1).

Динамические особенности (см. табл. 1) могут быть представлены графом динамических состояний и динамических форм взаимодействий (рис. 9 а, б).

Таблица 1. Особенности передаточного отношения $W_{11}(\gamma, p) \Big|_{p=j\omega}$ для $\gamma < \gamma_0$

Table 1. Features of the transfer ratio $W_{11}(\gamma, p) \Big|_{p=j\omega}$ for $\gamma < \gamma_0$

Частоты ω	[0]	(0, ω_1)	[ω_1]	(ω_1 , ω_2)	[ω_2]	(ω_2 , ∞)
$W_{11}(\gamma, p) \Big _{p=j\omega}$	$W_{11}(\gamma, 0)$	-	∞	+	∞	-

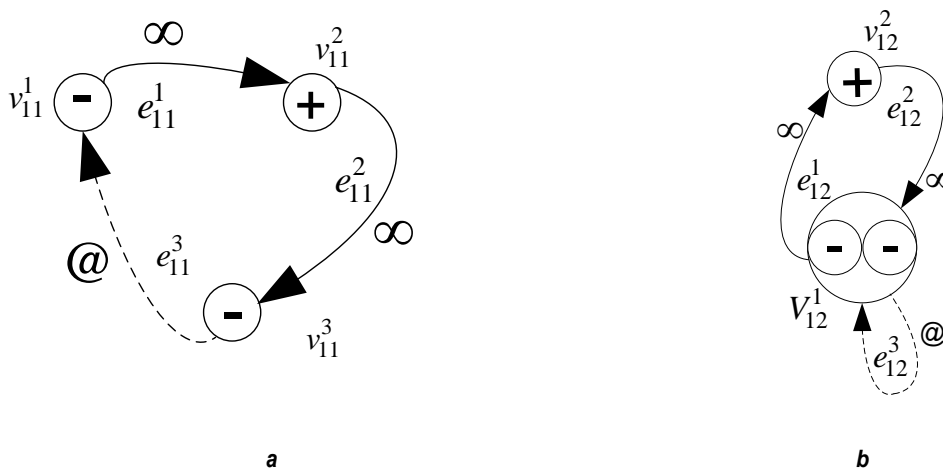


Рис. 9. Совокупности динамических форм взаимодействий объекта механической колебательной системы: а – граф $G_{11} = \{V_{11}, E_{11}\}$; б – граф $G_{12} = \{V_{12}, E_{12}\}$

Fig. 9. Sets of dynamic forms of interactions of an object of a mechanical oscillatory system: а – G_{11} graph = $\{V_{11}, E_{11}\}$; б – G_{12} graph = $\{V_{12}, E_{12}\}$

С учетом условий связности внешних сил (24) существенной особенностью является отсутствие состояния обнуления амплитуды колебания объекта на какой-либо частоте внешнего возмущения.

2. Рассматривается критическое значение параметра связности:

$$\gamma = \gamma_0. \quad (25)$$

Передаточное отношение (15) при условии (25) принимает вид:

$$W_{11}(\gamma, p)|_{p=j\omega} = \frac{\bar{y}_1}{Q_1} = \frac{-m_2 \omega^2}{m_1 m_2 (\omega^2 - \omega_1^2)(\omega^2 - \omega_2^2)}. \quad (26)$$

Особенности динамических форм взаимодействий объекта с учетом условия (25) определяются собственными частотами ω_1 и ω_2 системы (табл. 2).

Совокупность динамических особенностей (см. табл. 2) может быть представлена графами G_{21} , G_{22} (рис. 10 а, б).

Рассмотренная совокупность динамических особенностей может быть охарактеризована вырожденным состоянием обнуления амплитуды колебания объекта.

3. Рассматривается γ коэффициент связ-

ности, удовлетворяющий условиям:

$$\gamma_0 < \gamma < \gamma_1, \quad (27)$$

где критическое значение γ_1 является решением уравнения:

$$n_2^2 + \gamma_1 \Delta_2^2 = \omega_1^2. \quad (28)$$

При условии (27) передаточное отношение (15) принимает следующий вид:

$$W_{11}(\gamma, p)|_{p=j\omega} = \frac{\bar{y}_1}{Q_1} = \frac{-m_2(\omega^2 - \omega_0^2)}{m_1 m_2 (\omega^2 - \omega_1^2)(\omega^2 - \omega_2^2)}, \quad (29)$$

где выражение

$$\omega_0^2 = n_2^2 + \gamma \Delta_2^2 \quad (30)$$

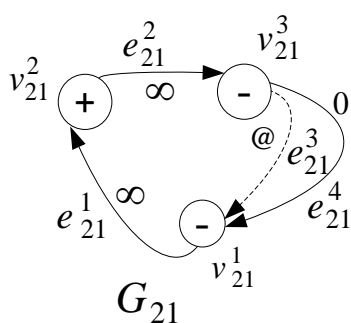
определяет частоту ω_0 обнуления амплитуды координаты y_1 на интервале $\omega_0 \in (0, \omega_1)$.

Особенности динамических форм взаимодействий элемента m_1 определяются частотой ω_0 обнуления амплитуды координаты y_1 и собственными частотами ω_1 и ω_2 системы (табл. 3).

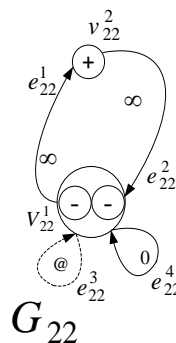
Таблица 2. Особенности передаточного отношения $W_{11}(\gamma, p)|_{p=j\omega}$ для $\gamma = \gamma_0$

Table 2. Features of the transfer ratio $W_{11}(\gamma, p)|_{p=j\omega}$ for $\gamma = \gamma_0$

Частоты ω	[0]	(0, ω_1)	[ω_1]	(ω_1 , ω_2)	[ω_2]	(ω_2 , ∞)
$W_{11}(\gamma, p) _{p=j\omega}$	0	-	∞	+	∞	-



а



б

Рис. 10. Совокупности динамических форм взаимодействий: а – граф $G_{21} = \{V_{21}, E_{21}\}$; б – граф $G_{22} = \{V_{22}, E_{22}\}$
 Fig. 10. Sets of dynamic forms of interactions: а – $G_{21} \text{ graph} = \{V_{21}, E_{21}\}$; б – $G_{22} \text{ graph} = \{V_{22}, E_{22}\}$

Таблица 3. Особенности передаточного отношения $W_{11}(\gamma, p)|_{p=j\omega}$ для $\gamma_0 < \gamma < \gamma_1$

Table 3. Features of the transfer ratio $W_{11}(\gamma, p)|_{p=j\omega}$ for $\gamma_0 < \gamma < \gamma_1$

Частоты ω	[0]	(0, ω_0)	$[\omega_0]$	(ω_0, ω_1)	$[\omega_1]$	(ω_1, ω_2)	$[\omega_2]$	(ω_2, ∞)
$W_{11}(\gamma, p) _{p=j\omega}$	$W_{11}(\gamma, 0)$	+	0	-	∞	+	∞	-

Совокупность динамических форм взаимодействий объекта может быть представлена графами G_{31} и G_{32} (рис. 11).

Приближение коэффициента связности γ к γ_1 может интерпретироваться как сближение частоты ω_0 с частотой ω_1 .

4. Рассматривается критическое значение коэффициента связности

$$\gamma = \gamma_1, \tag{31}$$

которое определяется из равенства

$$n_2^2 + \gamma_1 \Delta_2^2 = \omega_1^2. \tag{32}$$

При выполнении условия (31) передаточное отношение (15) принимает вид:

$$W_{11}(\gamma, p)|_{p=j\omega} = \frac{\bar{y}_1}{Q_1} = \frac{-m_2}{m_1 m_2 (\omega^2 - \omega_2^2)}. \tag{33}$$

Особенности форм взаимодействий элемента m_1 определяются совпадением частоты ω_0 с частотой ω_1 системы (табл. 4).

Совокупности динамических форм взаимодействий объекта механической колебательной системы могут быть представлены графом G_{41} (рис. 12).

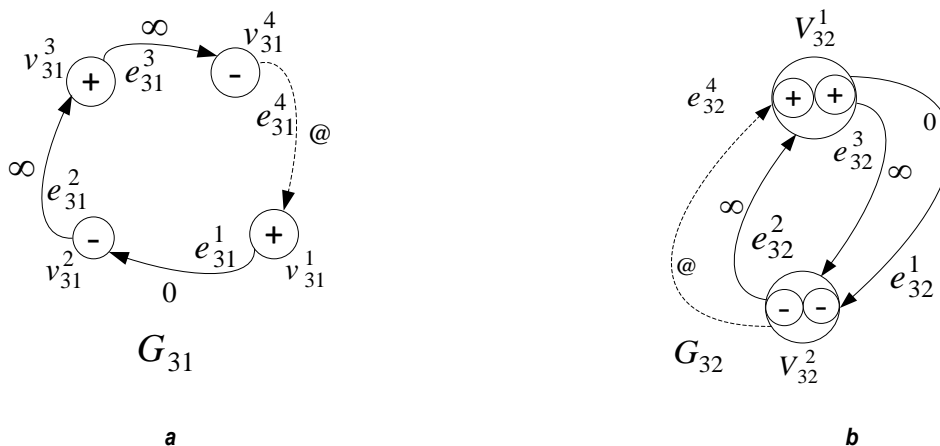


Рис. 11. Совокупности динамических форм взаимодействий объекта для коэффициента связности $\gamma_0 < \gamma < \gamma_1$:
a – граф $G_{31} = \{V_{31}, E_{31}\}$; b – граф $G_{32} = \{V_{32}, E_{32}\}$

Fig. 11. Sets of dynamic forms of object interactions for the connectivity coefficient $\gamma_0 < \gamma < \gamma_1$:
a – G_{31} graph = $\{V_{31}, E_{31}\}$; b – G_{32} graph = $\{V_{32}, E_{32}\}$

Таблица 4. Особенности передаточного отношения $W_{11}(\gamma, p)|_{p=j\omega}$ для $\gamma = \gamma_1$

Table 4. Features of the transfer ratio $W_{11}(\gamma, p)|_{p=j\omega}$ for $\gamma = \gamma_1$

Частоты ω	[0]	(0, ω_2)	$[\omega_2]$	(ω_2, ∞)
$W_{11}(\gamma, p) _{p=j\omega}$	$W_{11}(\gamma, 0)$	+	∞	-

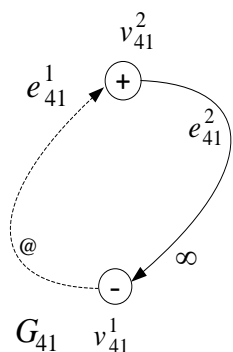


Рис. 12. Представление совокупности динамических особенностей в виде графа $G_{41} = \{V_{41}, E_{41}\}$
 Fig. 12. Representation of a set of dynamic features in the form of a graph $G_{41} = \{V_{41}, E_{41}\}$

Особенностью рассмотренной совокупности динамических форм взаимодействий объекта является отсутствие динамического состояния обнуления амплитуды колебания объекта.

5. Рассматривается значение коэффициента связности γ , удовлетворяющее условию:

$$\gamma_1 < \gamma < \gamma_2, \quad (34)$$

где критические значения $\gamma_1 < 0$ и $\gamma_2 > 0$ являются решениями уравнений:

$$n_2^2 + \gamma_1 \Delta_2^2 = \omega_1^2; \quad (35)$$

$$n_2^2 + \gamma_2 \Delta_2^2 = \omega_2^2. \quad (36)$$

При условии (34) передаточное отношение (15) принимает вид:

$$W_{11}(\gamma, p) \Big|_{p=j\omega} = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1} = \frac{-m_2(\omega^2 - \omega_0^2)}{m_1 m_2 (\omega^2 - \omega_1^2)(\omega^2 - \omega_2^2)}, \quad (37)$$

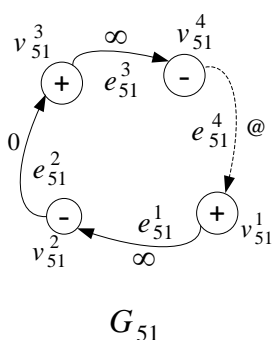
где выражение $\omega_0^2 = n_2^2 + \gamma \Delta_2^2$, зависящее от коэффициента связности γ , определяет значение ω_0 частоты обнуления координаты y_1 . Особенности динамических форм взаимодействий элемента m_1 определяются тем, что частота ω_0 обнуления амплитуды координаты y_1 находится между собственными частотами ω_1 и ω_2 (табл. 5).

Соответствующие совокупности динамических состояний и форм динамических взаимодействий элементов системы могут быть отображены посредством графов G_{51} , G_{52} (рис. 13 а, б).

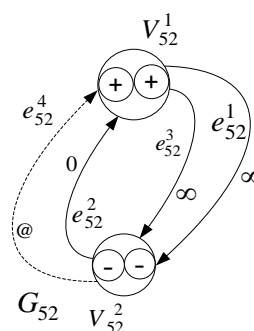
Таблица 5. Особенности передаточного отношения $W_{11}(\gamma, p) \Big|_{p=j\omega}$ для $\gamma_1 < \gamma < \gamma_2$

Table 5. Features of the transfer ratio $W_{11}(\gamma, p) \Big|_{p=j\omega}$ for $\gamma_1 < \gamma < \gamma_2$

Частоты ω	[0]	(0, ω_1)	[ω_1]	(ω_1 , ω_0)	[ω_0]	(ω_0 , ω_2)	[ω_2]	(ω_2 , ∞)
$W_{11}(\gamma, p) \Big _{p=j\omega}$	$W_{11}(\gamma, 0)$	+	∞	-	0	+	∞	-



a



b

Рис. 13. Совокупности форм динамических взаимодействий: а – граф $G_{51} = \{V_{51}, E_{51}\}$; б – граф $G_{52} = \{V_{52}, E_{52}\}$
 Fig. 13. Sets of forms of dynamic interactions: а – G_{51} graph = $\{V_{51}, E_{51}\}$; б – G_{52} graph = $\{V_{52}, E_{52}\}$

Представленные ориентированные графы отображают динамические особенности, для которых «переход» от «отрицательных» форм взаимодействий к «положительным» формам реализуется с помощью состояния обнуления амплитуды объекта, а «переход» от «положительных» форм к «отрицательным» реализуется с помощью состояния резонанса.

6. Рассматривается критическое значение

$$\gamma = \gamma_2 \tag{38}$$

коэффициента связности внешних возмущений, определенное из условий совпадения частоты обнуления ω_0 и второй собственной частоты ω_2 :

$$n_2^2 + \gamma_2 \Delta_2^2 = \omega_2^2. \tag{39}$$

Передаточное соотношение (15) принимает вид:

$$W_{11}(\gamma, p) \Big|_{p=j\omega} = \frac{\bar{y}_1}{Q_1} = \frac{-m_2}{m_1 m_2 (\omega^2 - \omega_1^2)}. \tag{40}$$

Соответствующие передачному отношению (40) особенности динамических форм взаимодействий объекта определяются совпадением частоты ω_0 с частотой ω_2 (табл. 6).

Совокупность динамических форм взаимодействий (см. табл. 6) может быть отображена графами G_{61} и G_{62} с учетом вариантов обобщения динамических форм взаимодействий объекта (рис. 14).

Особенность рассматриваемой динамической совокупности заключается в отсутствии динамического состояния обнуления координаты объекта.

7. Рассматривается значение γ коэффициента связности внешних возмущений, удовлетворяющее условию:

$$\gamma_2 < \gamma, \tag{41}$$

где критическое значение γ_2 определяется условием (39) совпадения частоты ω_0 обну-

ления координаты y_1 со второй собственной частотой ω_2 .

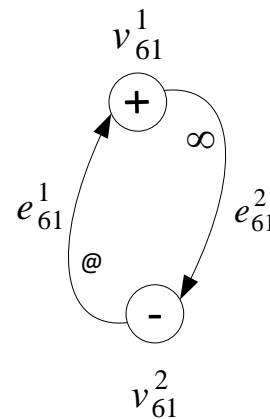


Рис. 14. Совокупность динамических особенностей в виде графа $G_{61} = \{V_{61}, E_{61}\}$

Fig. 14. Set of the dynamic features in the form of a graph $G_{61} = \{V_{61}, E_{61}\}$

Передаточное отношение (15) принимает вид:

$$\begin{aligned} W_{11}(\gamma, p) \Big|_{p=j\omega} &= \frac{\bar{y}_1}{Q_1} \\ &= \frac{-m_2 (\omega^2 - \omega_0^2)}{m_1 m_2 (\omega^2 - \omega_1^2) (\omega^2 - \omega_2^2)}, \end{aligned} \tag{42}$$

где $\omega_0^2 = n_2^2 + \gamma \Delta_2^2$ определяет частоту обнуления координаты y_1 .

Соответствующие динамические формы взаимодействий объекта определяются тем, что частота ω_0 обнуления амплитуды координаты y_1 превышает обе собственные частоты колебаний системы ω_1 и ω_2 (табл. 7).

Совокупность динамических форм может быть охарактеризована с помощью графов G_{71} и G_{72} (рис. 15).

Совокупности динамических форм взаимодействий объекта с учетом коэффициента связности представляют собой своеобразные динамические инварианты, обладающие специфичной интерпретацией динамических состояний как «переходов» между формами динамических взаимодействий. Рассмотренные динамические совокупности могут обладать признаками устойчивости или неустойчивости.

Таблица 6. Особенности передаточного отношения $W_{11}(\gamma, p)|_{p=j\omega}$ для $\gamma = \gamma_2$

Table 6. Features of the transfer ratio $W_{11}(\gamma, p)|_{p=j\omega}$ for $\gamma = \gamma_2$

Частоты ω	[0]	(0, ω_1)	[ω_1]	(ω_1, ∞)
$W_{11}(\gamma, p) _{p=j\omega}$	$W_{11}(\gamma, 0)$	+	∞	-

Таблица 7. Особенности передаточного отношения $W_{11}(\gamma, p)|_{p=j\omega}$ для $\gamma_2 < \gamma$

Table 7. Features of the transfer ratio $W_{11}(\gamma, p)|_{p=j\omega}$ for $\gamma_2 < \gamma$

Частоты ω	[0]	(0, ω_1)	[ω_1]	(ω_1, ω_2)	[ω_2]	(ω_2, ω_0)	[ω_0]	(ω_0, ∞)
$W_{11}(\gamma, p) _{p=j\omega}$	$W_{11}(\gamma, 0)$	+	∞	-	∞	+	0	-

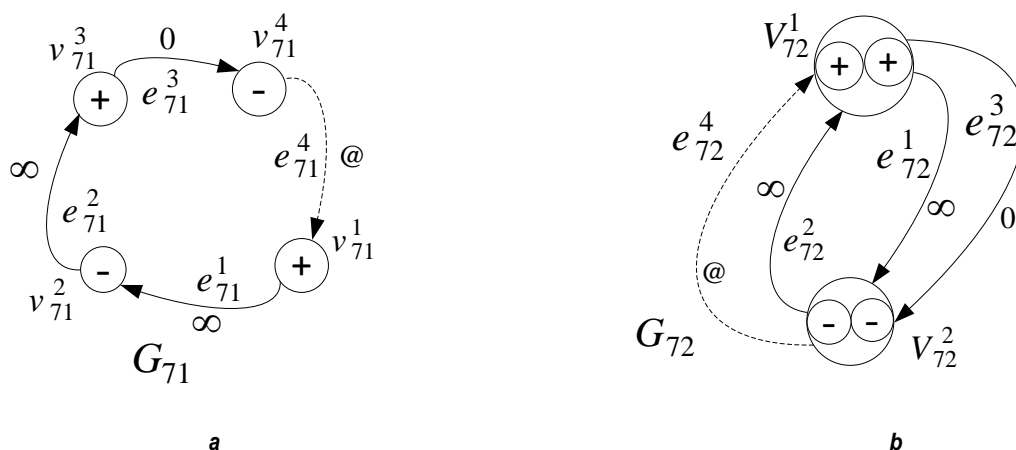


Рис. 15. Совокупность динамических форм взаимодействий объекта с координатой y_1 для коэффициента связности γ : а – граф $G_{71} = \{V_{71}, E_{71}\}$; б – граф $G_{72} = \{V_{72}, E_{72}\}$

Fig. 15. Set of the dynamic forms of interactions of an object with the y_1 coordinate for the connectivity coefficient γ : а – G_{71} graph = $\{V_{71}, E_{71}\}$, б – G_{72} graph = $\{V_{72}, E_{72}\}$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Совокупность динамических форм взаимодействий для фиксированного коэффициента связности может быть представлена в виде графов с учетом специфики отождествления форм взаимодействия. Выбор специфики отождествления динамических форм взаимодействий определяет характер детализации, требуемой для решения задачи.

Для определения существенных особенностей динамических форм взаимодействий объекта с учетом коэффициента связности внешних силовых возмущений графы динамических форм (см. рис. 9–15) могут быть приведены к обобщенному виду G_I-G_{VII} (табл. 8), в котором формы динамических взаимодействий отождествлены между собой и

представлены единственной вершиной с множеством петель.

Совокупности динамических форм взаимодействий объекта, рассматриваемые как динамические инварианты, соответствующие множествам варьируемого параметра, могут обладать признаками устойчивости или неустойчивости. Дополнительно возможно развитие методологии в рамках рассмотрения динамических совокупностей механических колебательных систем, включающих в свой состав устройства для преобразования движения. Можно предположить, что предложенная методология обладает потенциалом использования для оценки динамических особенностей, связанных с учетом неударяющих связей, обеспечивающих ненарушение контакта массоинерционных элемен-

тов механических колебательных систем, находящихся в условиях вибрационного нагружения силовой или кинематической природы. Аналогично возможно расширение разработанного подхода для учета сочленений в механических колебательных системах, находящихся в условиях вибрационного нагружения связанных силовых воздействий. Необходимо отметить, что предложенная методология может быть применена к оценке динамических особенностей рычажных свойств на основе графо-аналитической интерпретации амплитудно-частотных характеристик передаточных функций межпарциальных связей.

Вместе с тем открытыми вопросами, связанными с многообразием динамических инвариантов, соответствующих различным передаточным отношениям, являются вопросы, связанные с выбором объекта, динамическое состояние которого оценивается, и с выбором системы координат. Дополнительной детализации представлений требуют динами-

ческие инварианты, которые соответствуют предельным значениям рассматриваемых коэффициентов связности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развивается системный подход к оценке динамических форм взаимодействий элементов механических колебательных систем на основе представления динамических особенностей в виде ориентированных графов, отображающих положительные и отрицательные формы динамических взаимодействий в виде вершин, а динамические состояния – в виде направленных дуг. Показана принципиальная возможность графо-аналитической интерпретации амплитудно-частотных характеристик передаточных функций для семейства структурных схем механических колебательных систем, находящихся в условиях нагружения силовыми возмущениями, зависящими от так называемого коэффициента связности.

Таблица 8. Обобщенные представления о динамических формах взаимодействий
Table 8. Generalized representations about the dynamic forms of interactions

№	I	II	III	
Условия	$\gamma < \gamma_0$	$\gamma = \gamma_0$	$\gamma_0 < \gamma < \gamma_1$	
Динамические инварианты				
№	IV	V	VI	VII
Условия	$\gamma = \gamma_1$	$\gamma_1 < \gamma < \gamma_2$	$\gamma = \gamma_2$	$\gamma_2 < \gamma$
Динамические инварианты				

Показано, что многообразие форм динамических взаимодействий механических колебательных систем с учетом коэффициента связности может быть представлено конечным набором графов, рассматриваемых в качестве своеобразных инвариантов, отображающих существенные динамические особенности в виде совокупности положительных и отрицательных динамических форм и состояний, в общем случае представляющих собой резонанс и состояния обнуления ам-

плитуд колебаний объекта оценки.

Таким образом, создана методологическая база технологии структурного математического моделирования в приложении к механическим колебательным системам, используемым в качестве расчетных схем в задачах системного анализа обеспечения безопасности работы технических объектов транспортного и технологического назначения, находящихся в условиях вибрационного нагружения.

Список источников

1. Махутов Н. А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. Новосибирск: Изд-во «Наука», 2017. 724 с.
2. Лапидус Б. М. О формировании актуальных направлений фундаментальных научных исследований в интересах опережающего развития ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2019. № 6. С. 26–30.
3. Стиславский А. Б., Цыгичко В. Н. Формальная постановка задачи обеспечения безопасности транспортного комплекса // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2009. № 41. С. 52–73.
4. De Silva C. W. Fundamentals and practice. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000. 957 p.
5. Harris C. M., Crede C. E. Shock and vibration handbook. New York: McGraw – Hill Book Co, 2002. 1457 p.
6. Iwnicki S. Handbook of railway vehicle dynamics. Boca Raton: CRC Press, 2006. 552 p.
7. Banakh L. Ya., Kempner M. L. Vibrations of mechanical systems with regular structure. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, 2010. 262 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03126-7>.
8. Ден-Гартог Д. П. Механические колебания / пер. с 4-го америк. изд. А. Н. Обморшева. М.: Изд-во «Физматгиз», 1960. 580 с.
9. Лурье А. И. Аналитическая механика. М.: Изд-во «ГИФМЛ», 1961. 824 с.
10. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Теория колебаний в инженерном деле. М.: Изд-во «Машиностроение», 1985. 472 с.
11. Банах Л. Я. Колебания механических систем с самоподобной структурой // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4. С. 52–53.
12. Eliseev S. V., Eliseev A. V. Theory of oscillations. Structural mathematical modeling in problems of dynamics of technical objects // Studies in Systems, Decision and Control. Vol. 252. Cham: Springer, 2020, 521 p.
13. Коловский М. З. Автоматическое управление виброзащитными системами. М.: Изд-во «Наука», 1976. 320 с.
14. Елисеев С. В., Резник Ю. Н., Хоменко А. П., Засядко А. А. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов: монография. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2008. 523 с.
15. Хоменко А. П., Елисеев С. В., Ермошенко Ю. В. Системный анализ и математическое моделирование в мехатронике виброзащитных систем. Иркутск: Изд-во ИРГУПС, 2012. 288 с.
16. Karnovsky I. A., Lebed E. Theory of vibration protection // Engineering. Cham: Springer, 2016. 674 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28020-2>.
17. Елисеев А. В. Особенности взаимодействия материальной частицы с вибрирующей поверхностью в зависимости от дополнительной силы с неудерживающей связью // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 3. С. 9–15.
18. Елисеев А. В. Особенности реализации режима кратного подбрасывания в модельной задаче с неудерживающей связью при наличии вязкого трения // Наука в центральной России. 2013. № 2S. С. 42–47.
19. Гуськов А. М., Пановко Г. Я., Шохин А. Е. Расчет стержневой пространственной системы виброизоляции твердого тела при транспортной вибрации // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 2. С. 17–24.
20. Елисеев А. В., Кузнецов Н. К., Московских А. О. Динамика машин. Системные представления, структурные схемы и связи элементов: монография. М.: Изд-во «Инновационное машиностроение», 2019. 381 с.
21. Елисеев С. В., Елисеев А. В., Большаков Р. С., Хоменко А. П. Методология системного анализа в задачах оценки, формирования и управления динамическим состоянием технологических и транспортных машин. Новосибирск: Изд-во «Наука», 2021. 679 с.
22. Лурье А. И. Операционное исчисление и применение в технических приложениях. М.: Изд-во «Наука», 1959. 368 с.
23. Елисеев А. В., Миронов А. С. Новые подходы к оценке режимов динамического гашения колебаний вибрационных машин транспортного и технологического назначения: графы динамических состояний и

форм взаимодействия элементов // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2022. № 9. С. 23–29. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2022-9-23-39>.
24. Елисеев А. В., Миронов А. С. Методологические подходы к оценке совокупности динамических состоя-

ний и форм взаимодействий элементов вибрационных машин транспортного и технологического назначения // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2022. № 28. P. 22–25. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2022-28-22-25>.

References

1. Makhutov N. A. *Safety and risks: system research and development*. Novosibirsk: Nauka; 2017, 724 p. (In Russ.).
2. Lapidus B. M. On the formation of up-to-date areas of fundamental scientific research in the interests of the advanced development of JSC Russian Railways. *Zheleznodorozhnyi transport*. 2019;6:26-30. (In Russ.).
3. Stislavskij A. B., Cygichko V. N. Formal setting of the problem of transport complex safety provision. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossijskoj akademii nauk*. 2009;41:52-73. (In Russ.).
4. De Silva C. W. *Fundamentals and practice*. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press; 2000, 957 p.
5. Harris C. M., Crede C. E. *Shock and vibration handbook*. New York: McGraw – Hill Book Co; 2002, 1457 p.
6. Iwnicki S. *Handbook of railway vehicle dynamics*. Boca Raton: CRC Press; 2006, 552 p.
7. Banakh L. Ya., Kempner M. L. *Vibrations of mechanical systems with regular structure*. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer; 2010, 262 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03126-7>.
8. Den Hartog J. P. *Mechanical vibrations*, 1960. 580 p. (Russ. ed.: *Mekhanicheskie kolebaniya*. Moscow, Fizmatgiz; 1960, 580 p.)
9. Lur'e A. I. *Analytical mechanics*. Moscow: IGIFML; 1961, 824 p. (In Russ.).
10. Timoshenko S. P., Young D. H., Uiver U. *Vibration problems in engineering*. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 472 p. (In Russ.).
11. Banakh L. Ya. Vibrations of mechanical systems with self-similar structure. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2011;4:52-53. (In Russ.).
12. Eliseev S. V., Eliseev A. V. Theory of oscillations. Structural mathematical modeling in problems of dynamics of technical objects. In: *Studies in Systems, Decision and Control*. Vol. 252. Cham: Springer; 2020, 521 p.
13. Kolovskij M. Z. *Automatic control of vibration protection systems*. Moscow: Nauka; 1976, 320 p. (In Russ.).
14. Eliseev S. V., Reznik Yu. N., Khomenko A. P., Zasyadko A. A. *Dynamic synthesis in the generalized problems of vibration protection and vibration insulation of technical objects*. Irkutsk: Irkutsk State University; 2008, 523 p. (In Russ.).
15. Khomenko A. P., Eliseev S. V., Ermoshenko Yu. V. *System analysis and mathematical modeling in vibration protection system mechatronics*. Irkutsk: Irkutsk State University of Railway Engineering; 2012, 288 p. (In Russ.).
16. Karnovsky I. A., Lebed E. Theory of vibration protection. In: *Engineering*. Cham: Springer; 2016, 674 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28020-2>.
17. Eliseev A. V. *Interaction features of the material particle and a vibrating surface depending on the additional force with a unilateral constraint*. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij = International Journal of Applied and Basic Research*. 2013;3:9-15. (In Russ.).
18. Eliseev A. V. Realization features of multiple mode tossing in the model problem with "not holding" ties on the presence of viscous forces. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*. 2013;2S:42-47. (In Russ.).
19. Gus'kov A. M., Panovko G. Ya., Shohin A. E. The calculation of the spatial vibration isolation system of a solid body under transport vibration. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2012;2:17-24. (In Russ.).
20. Eliseev A. V., Kuznetsov N. K., Moskovskikh A. O. *Dynamics of machines. System concepts, structural diagrams and element relationships*. Moscow: Innovacionnoe mashinostroenie; 2019, 381 p. (In Russ.).
21. Eliseev S. V., Eliseev A. V., Bol'shakov R. S., Khomenko A. P. *Methodology of system analysis in the problems of assessment, formation and control of the dynamic state of technological and transport machines*. Novosibirsk: Nauka; 2021, 679 p. (In Russ.).
22. Lur'e A. I. *Operational calculus and application in engineering applications*. Moscow: Nauka; 1959, 368 p. (In Russ.).
23. Eliseev A. V., Mironov A. S. New approaches to the assessment of the modes of dynamic damping of vibrations of elements of vibrating machines for transport and technological purposes: graphs of dynamic states and forms of interactions. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2022;9:23-29. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2022-9-23-39>.
24. Eliseev A. V., Mironov A. S. Methodological approaches to the assessment of the totality of dynamic states and forms of interactions of elements of vibrating machines for transport and technological purposes. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2022;28:22-25. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2022-28-22-25>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Елисеев Андрей Владимирович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры математики,
Иркутский государственный университет путей
сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
доцент кафедры конструирования и стандартизации в
машиностроении,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Кузнецов Николай Константинович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования и
стандартизации в машиностроении,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 23.03.2022; одобрена после рецензирования 15.06.2022; принята к публикации 06.09.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey V. Eliseev,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Mathematics,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Nikolay K. Kuznetsov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Design and Standardization in
Mechanical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 23.03.2022; approved after reviewing 15.06.2022; accepted for publication 06.09.2022.



Научная статья

УДК 539.3

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-386-400>

Трансформация геометрии образца для механических испытаний конструкционных материалов в FDM-структуре

Лев Игоревич Шеметов¹, Вера Борисовна Распопина^{2✉}, Антон Сергеевич Чернышков³

¹⁻³*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

¹*vbr2604@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5955-6714>*

²*vbr2604@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8960-5644>*

³*vbr2604@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9128-0738>*

Резюме. Цель – определить в первом приближении размер и форму образца для экспериментального исследования механических характеристик нитевидной структуры FDM-печати (FDM-структура) с невысоким процентом заполнения при центральном растяжении. На данном этапе разработки геометрии образца в качестве базовых были приняты размеры и форма образца, регламентированного ГОСТ 17370-2017 «Пластмассы ячеистые жесткие. Метод испытания на растяжение». В работе был задействован конечно-элементный анализ параметров напряженного состояния в автоматизированной среде, элементы теории подкрепленных оболочек и натурные испытания. Основанием для упрощения геометрии конечно-элементной модели исследуемых образцов стала теория подкрепленных оболочек. Конечно-элементный анализ выполнялся в линейной постановке, на результатах которого, в сочетании с анализом технологической модели проектируемого образца, принималось решение о трансформации геометрии образца. Для изготовления образцов применялся шаблон «линии» с ориентацией вдоль продольной оси образца. Результаты натурных испытаний являлись основанием для окончательного вывода об успешности внесенных изменений. Критерием успешности является разрушение FDM-образца в пределах рабочей части. В результате проделанной работы изменения претерпела как внешняя, так и внутренняя геометрия образца-прототипа. Это позволило сместить главный акцент в работе растягиваемого FDM-образца на его рабочую часть, скорректировать траекторию силовых потоков с поправкой на специфику FDM-печати. Натурные испытания FDM-образца с невысоким процентом заполнения шаблоном «линии» показали стабильно удовлетворительный результат: разрушения происходили в рабочей части испытываемых образцов. В ходе исследований была определена общая тенденция зависимости распределения силового потока по объему образца от сочетания траектории укладки нити печати с внешней и внутренней геометриями образца. В продолжении данных исследований планируется детальный анализ и формализация полученных результатов с распространением на разные шаблоны печати.

Ключевые слова: 3d-технологии, FDM-печать, FDM-образец, напряжения Мизеса, конечно-элементный анализ, рабочая часть образца

Для цитирования: Шеметов Л. И., Распопина В. Б., Чернышков А. С. Трансформация геометрии образца для механических испытаний конструкционных материалов в FDM-структуре // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 386–400. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-386-400>.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Sample geometry transformation for mechanical tests of constructional materials in an FDM structure

Lev I. Shemetov¹, Vera B. Raspopina^{2✉}, Anton S. Chernyshkov³

¹⁻³*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

¹*vbr2604@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5955-6714>*

²*vbr2604@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8960-5644>*

³*vbr2604@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9128-0738>*

© Шеметов Л. И., Распопина В. Б., Чернышков А. С., 2022

Abstract. The aim was to obtain a rough determination of the dimensions and shape of a sample for an experimental study of the mechanical characteristics of filamentary FDM-printing structures with a low filling at central tension. The sample geometry was designed based on the dimensions and shape provided in the GOST 17370-2017 "Cellular rigid plastics. Tension testing method". The research methods included the finite element analysis of stress state parameters in an automated environment, elements of the stiffened shell theory and experimental testing of samples. The theory of stiffened shells was used to simplify the geometry of the finite element model for the studied samples. Finite element analysis was carried out in a linear formulation and, based on the results of its combination with the analysis of the technological model of a designed sample, a decision on transforming the sample geometry was made. The samples were produced using a "line" template with an orientation along the longitudinal axis of the sample. According to the results of testing the samples, a conclusion about the success of implied transformation was made. The success criterion involves the destruction of an FDM sample within the limits of the working part. As a result, both external and internal geometries of the prototype sample were transformed. This allowed the main emphasis in the work of the stretchable FDM sample to be shifted to its working part and the trajectory of power flows to be adjusted according to the FDM-printing specifics. Experimental testing of FDM samples with a low "line" template filling showed a consistently satisfactory result: fractures occurred in the working part of test samples. In the course of the studies, the general trend in the dependence of the force flow distribution over the sample volume on the combination of the printing thread trajectory with external and internal geometries of the sample was determined. Future work will focus on a more detailed analysis and formalisation of the obtained results with regard to various printing templates.

Keywords: 3d technologies, FDM printing, FDM sample, Mises stresses, finite element analysis, working part of the sample

For citation: Shemetov L. I., Raspopina V. B., Chernyshkov A. S. Sample geometry transformation for mechanical tests of constructional materials in an FDM structure. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):386-400. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-386-400>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент на передовой высокотехнологичных производств находятся аддитивные технологии [1, 2]. Они представляют большой интерес для таких отраслей промышленности, как авиастроение, автомобилестроение, приборостроение, медицина и пр. Привлекательность данных технологий обусловлена главным образом возможностью создания деталей практически любой геометрической формы и размера при относительной простоте технологического процесса. Деталь послойно «выращивается» на 3d-принтере с помощью управляющей про-

граммы в соответствии с заданной цифровой моделью.

К числу наиболее популярных относится аддитивная технология, которую называют FDM-технология (метод послойного наплавления, от англ. fused deposition modeling). Ее популярность обусловлена сочетанием экономичности, доступности, простоты реализации и возможности совершенствовать технологичность изделия. В основе FDM-технологии или FDM-печати лежит экструзия материала⁴ [3–5], в результате которой формируется нить. Сопло экструдера, перемещаясь по заданной программой траектории,

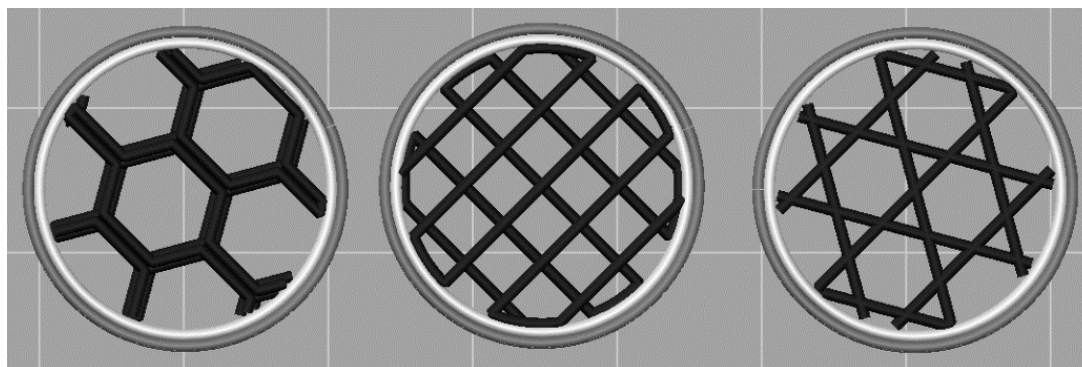


Рис. 1. Модели внутренней структуры FDM-деталей
Fig. 1. Models of the internal structure of FDM parts

⁴Виноградов В. М. Практикум по технологии переработки пластических масс: учеб. пособ. / под ред. В. М. Виноградова, Г. С. Головкина. М.: Изд-во «Химия», 1980. 240 с.

укладывает нить слой за слоем в соответствующее 3d-модели изделие. При этом имеет место мезо- или макронесплошное заполнение объема детали (рис. 1).

В качестве материала используют термопластики в форме филамента. Линейка материалов непрерывно расширяется в сторону конструкционных материалов с высокими механическими характеристиками [6, 7]. Это обусловлено острой потребностью в создании по данной технологии несущих деталей.

Однако специфика FDM-технологии такова, что механические характеристики материала неравнозначны механическим характеристикам изделия [8]. В частности, на прочность изделия, помимо свойств материала, влияют следующие факторы: режим печати (скорость печати, скорость подачи материала, температурный режим и т.д.); шаблон печати; процент заполнения объема детали; толщина внешней оболочки, закрывающей FDM-структуру и образующей заданную для детали геометрию [9, 10]. Наряду с этим следует учитывать адгезионную прочность между слоями, образованными нитями печати, и между нитями в пределах слоя. В настоящее время отсутствует стройная теория анализа прочности изделий, выполненных с помощью FDM-печати, учитывающая все перечисленные факторы.

В частности, теоретические основы анализа прочности деталей, выполненных с применением вычитающих или формообразующих технологий, опираясь на гипотезу о сплошности материала, не учитывают любую

дискретность структуры, заполняющей объем детали⁵ [11, 12]. Следовательно, ими нельзя воспользоваться для корректного прочностного анализа FDM-детали. Можно предположить, что в некоторой мере FDM-структура представляет собой некую конструкцию, образованную нитями печати. И чем меньше процент заполнения, тем отчетливее это проявляется (рис. 2).

Теоретические основы оценки прочности изделий, выполненных с помощью традиционных технологий, во многом определены экспериментальными исследованиями. Испытания такого рода проводят в соответствии со стандартами, регламентирующими параметры образцов для соответствующих материалов, условия проведения испытаний этих образцов и анализ результатов испытаний. В основе анализа результатов эксперимента лежат соотношения, которые имеют силу в контексте гипотезы об однородности и сплошности материала. Например, чтобы построить условную диаграмму растяжения любого материала, нормальные напряжения определяют с помощью формулы вида:

$$\sigma = N/A,$$

где σ – нормальные напряжения, действующие в поперечных сечениях рабочей части растянутого образца, МПа; N – продольная сила, действующая в поперечных сечениях рабочей части растянутого образца, Н; A – величина площади поперечных сечений рабочей части образца до деформации, мм².

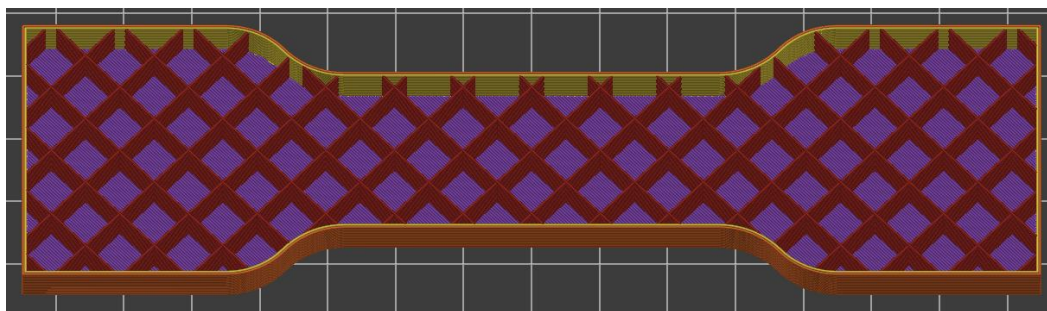


Рис. 2. 3d-модель шаблона печати «линии» с процентом заполнения объема детали 5%
Fig. 2. 3d model of the "line" printing template with the 5% filling of the part volume

⁵Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела: учеб. пособ. для вузов. 2-е изд., испр. М.: Изд-во «Наука», 1988. 712 с.

Путем экспериментов в настоящее время идут исследователи механических характеристик FDM-изделий. Как правило, суть таких исследований сводится к испытаниям FDM-образцов в условиях простых видов нагружения [13–21]. Наиболее распространено испытание образцов на растяжение. При простоте исполнения эксперимента гарантированы результаты, достоверно характеризующие механические характеристики исследуемой FDM-структуры из конкретного материала. Понятие «напряжение» в данных исследованиях отсутствует либо является условным.

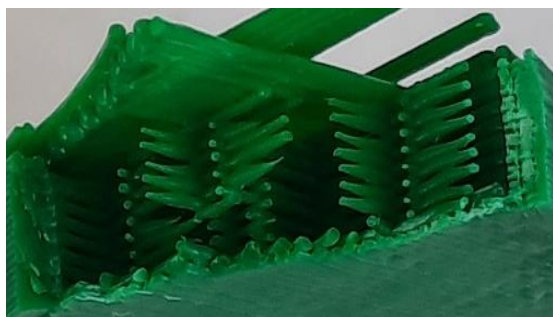
ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Образцы, выполненные с применением FDM-печати, испытывают на растяжение, используя по общеизвестным причинам стандарты для определения механических свойств пластмасс. Однако FDM-структура, формирующая образец, не соответствует модели сплошности материала, лежащей в основе формирования данных стандартов. Причем это несоответствие увеличивается по мере уменьшения процента заполнения, что сказывается на достоверности определения механических характеристик исследуемой FDM-структуры. Например, это актуально для образца типа 1А, геометрия которого регламентирована ГОСТ 11262-2017⁶ (размеры поперечного сечения 10×4), напечатанного шаблоном печати «линии» (рис. 3).

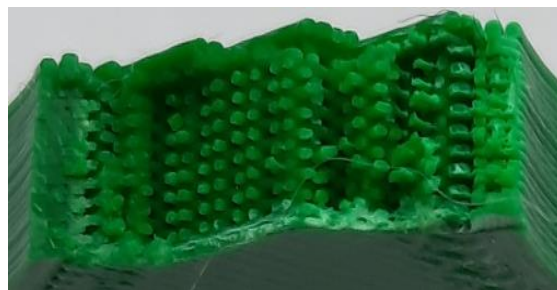
Шаблон «линии» (см. рис. 2) формируется параллельными, равномерно распределен-

ными по слою нитями печати. Направление нитей периодически меняется от слоя к слою на 90°. Слои «прикрепляются» друг к другу «точечно» в зонах контакта. По мере уменьшения процента заполнения сокращается число нитей печати в каждом слое, уменьшается число точек межслойного контакта, увеличиваются размеры сторон ячеек структуры (рис. 3). В частности, при заполнении 20% размеры ячеек становятся соизмеримы с высотой поперечного сечения рабочей части образца (см. рис. 3 а). Причем высота и ширина этого сечения, приходящиеся на FDM-структуру, сокращаются за счет толщины внешней оболочки. В этом случае становится значительным влияние внешней оболочки на работу структуры. Когда размеры ячеек одного порядка с толщиной нити печати, например, при заполнении 60% (см. рис. 3 б), влияние фактора внешней оболочки гаснет в пределах примыкающих к ним ячеек.

Следовательно, для оценки механических характеристик структур с невысоким процентом заполнения следует соответствующим образом масштабировать образцы. На данном этапе исследований в качестве базового принят шаблон печати «линии». Простота его геометрии обуславливает очевидность распределения силовых потоков и прочих сопутствующих параметров. Под невысоким процентом заполнения для этого шаблона в работе принято полагать величины порядка 50% заполнения и ниже.



a



b

Рис. 3. FDM-структура образца типа 1А, ГОСТ 11262-2017⁶: а – заполнение 20%; б – заполнение 60%
Fig. 3. FDM-structure of 1A type sample, GOST 11262-2017⁶: a – 20% filling; b – 60% filling

⁶ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012). Пластмассы. Метод испытания на растяжение (ISO 527-2:2012, Plastics – Determination of tensile properties – Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics, MOD). М.: Изд-во «Стандартинформ», 2018.

Анализ стандартов для испытания пластмасс на растяжение позволил предположить, что наиболее подходящим для оценки механических характеристик FDM-структуры с невысоким процентом заполнения является образец типа 1, регламентированный ГОСТ 17370-2017⁷ «Пластмассы ячеистые жесткие. Метод испытания на растяжение», рис. 4.

Геометрия такого образца учитывает регулярные мезо- и макронесплошности, значит, рабочая часть образца соответствующим образом масштабирована. При оценке механических характеристик таких материалов учитывается объемное соотношение газовой и полимерной фаз. Как правило, данные материалы имеют относительно равномерную ячеистую структуру, плотность которой в той или иной мере обеспечивается параметрами технологического процесса⁸. В некотором приближении структуру, заполняющую FDM-образец по шаблону «линии» с 50% заполнением и менее, можно считать эквивалентной ячеистой в рамках ГОСТ 17370-2017⁷.

Были проведены статические испытания FDM-образцов, изготовленных в соответствии с обозначенной геометрией (см. рис. 4). Образцы разрушились за пределами рабочей зоны. На рис. 5 представлены типичные разрушенные образцы, напечатанные

шаблоном «линии» с процентом заполнения 50%, с толщиной внешней оболочки 0,4 мм (см. рис. 5 а) и с толщиной внешней оболочки 0,8 мм (см. рис. 5 б). Материал филамента – термопластик PetG (полиэтилентерефталат-гликоль). Диаметр филамента – 1,75 мм. Образцы были изготовлены на принтере Anycubic i3 Mega со средней скоростью печати 50 мм/с при температуре рабочего стола 90°C и температуре сопла 235°C.

Однако именно рабочая часть (длина 50 мм, см. рис. 4) растягиваемого образца является объектом исследования. Разрушение же образца происходит в зоне перехода между широкой частью образца для фиксации в захватах разрывной машины и рабочей частью образца. В пределах последней практически никаких изменений не наблюдается. Очевидно то, что зона перехода является концентратором напряжений. Однако требования ГОСТ 17370-2017⁷ к геометрии образцов априори должны исключать влияние данного фактора на поведение исследуемой области образца в ходе испытания. Напрашивается предположение о том, что в данном случае негативное влияние на характер распределения напряжений оказывает неучтенная ГОСТ 17370-2017⁷ нитевидная структура FDM-печати. Имеет место наложение макро-и мезоконцентраторов напряжений.

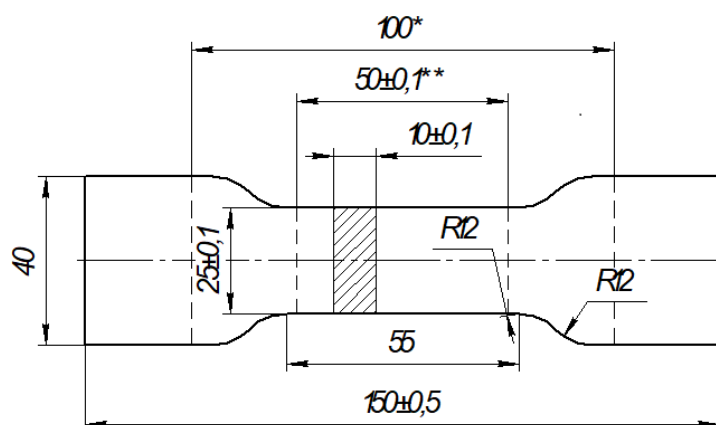


Рис. 4. Образец типа 1 для испытания ячеистых жестких пластмасс на растяжение
Fig. 4. Type 1 sample for tensile testing of cellular rigid plastics

⁷ГОСТ 17370-2017 (ISO 1926:2009). Пластмассы ячеистые жесткие. Метод испытания на растяжение (ISO 1926:2009, Rigid cellular plastics – Determination of tensile properties, MOD). М.: Изд-во «Стандартинформ», 2018.

⁸Ярцев В. П., Андрианов К. А., Иванов Д. В. Физико-механические и технологические основы применения пенополистирола при дополнительном утеплении зданий и сооружений: учеб. пособ. Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. 120 с.



Рис. 5. Разрушенные FDM-образцы, напечатанные на 3d-принтере:
a – толщина внешней оболочки 0,4 мм; b – толщина внешней оболочки 0,8 мм
Fig. 5. Destroyed FDM samples printed on a 3d printer: a – outer shell thickness is 0.4 mm;
b – outer shell thickness is 0.8 mm

Под макроконцентратором понимается галтель, под мезоконцентраторами – особенности FDM-структуры [23].

На рис. 6 а показан фрагмент 3d-модели зоны перехода в образце при заполнении в 50% и толщине внешней оболочки 0,8 мм. На рис. 6 б представлен фрагмент разрушенного образца. Натурные эксперименты показывают, что макротрещина начинает зарождаться во внешней боковой поверхности в зоне искривления траектории нити во внешней оболочке, рис. 6 с.

Несмотря на неудовлетворительные результаты испытаний образцов, решено в качестве прототипа оставить образец типа 1, ГОСТ 17370-2017⁷ (см. рис. 4). Регулярность структуры, допускаемое соотношение объемов газовой и полимерной фаз ячеистой структуры [22] в сравнении с нитевидной структурой шаблона печати «линии» являются основанием для такого решения.

Чтобы сместить приоритет активности параметров напряженно-деформированного состояния в рабочую зону FDM-образца, требуется модификация геометрии за пределами его рабочей части с поправкой на специфику FDM-печати. На данном этапе разработки решено выполнять исследования, опираясь на феноменологический подход в контексте натурных испытаний образцов в сочетании с конечно-элементным (КЭ) анализом параметров напряженного состояния в авто-

матизированной среде на примере шаблона печати «линии».

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В действительности, при заполнении объема образца FDM-структурой в 50% (см. рис. 6 а) и менее (см. рис. 2, см. рис. 3 а) можно говорить о конструктивно-силовых схемах подкрепленных пластин и оболочек. Последние воспринимают значимую долю нагрузки. Эта доля зависит от процента заполнения детали при неизменной толщине оболочки. В частности, данный факт подтвердил численный эксперимент, описанный в работе [23].

Предположение о подкрепленных пластинах и оболочках, формирующих корпус FDM-образца, позволяет построить простую и информативную КЭ-ю модель образца, учитывая только его корпус. Анализ такой модели способен показать общую тенденцию влияния геометрии образца (см. рис. 4) на характер распределения напряжений по корпусу. Эксперименты показали, что разрушение образцов начинается с боковой поверхности корпуса в зоне галтели (см. рис. 6 с).

Достаточно решить задачу в линейной постановке, а для анализа влияния достаточно информации о напряжениях Мизеса – эквивалентных напряжениях, определяемых в соответствии с энергетической гипотезой формоизменения Фон Мизеса:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)},$$

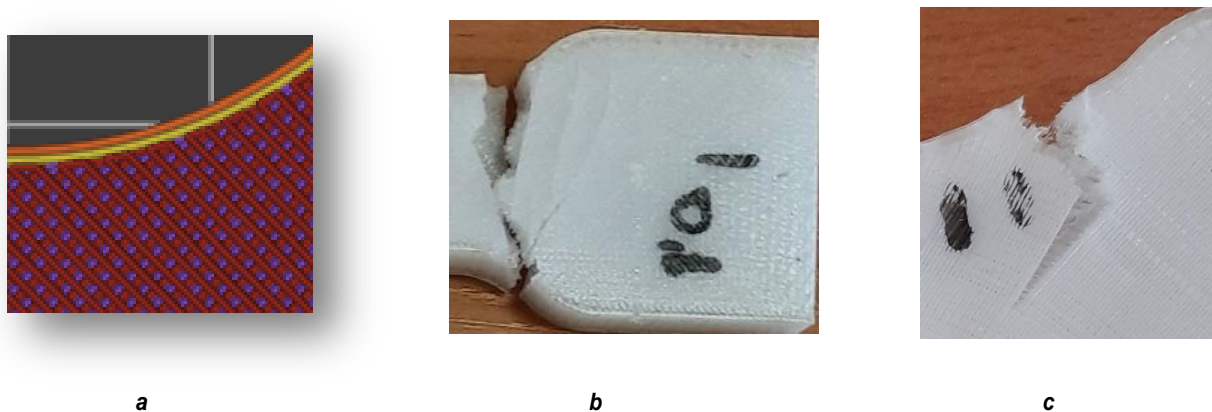


Рис. 6. Область разрушения FDM-образца, напечатанного шаблоном «линии» с заполнением 50%: а – 3d-модель нитевидной структуры; б – разрушение в зоне перехода; с – начало разрушения
Fig. 6. The destruction area of the FDM sample printed with the "line" template with 50% filling: a – 3d model of the filamentary structure; b – destruction in the transition zone; c – destruction origin

где σ_x , σ_y , σ_z , T_{xy} , T_{yz} , T_{zx} – компоненты тензора напряжений для рассматриваемой точки исследуемого объема детали.

Решение данной задачи осуществлялось в автоматизированной среде КЭ-го анализа модуля APM FEM (автоматизированное проектирование машин), интегрированного в САД-программу КОМПАС-3D.

Прототипом для КЭ-й модели принят FDM-образец с постоянной толщиной корпуса 0,8 мм с 50% заполнением (см. рис. 5 б). Задана величина растягивающей нагрузки 2000 Н. Она обеспечивает нормальные напряжения в сечениях полый рабочей части образца в 36 МПа. Для модели образца принято значение модуля Юнга материала 2000 МПа. Данное значение модуля коррелируется с данными о

модуле Юнга для термопластика PetG, из которого изготовлены образцы.

В силу симметрии формы образца, симметрии его условий закрепления и нагружения для КЭ-го анализа была построена модель половины образца (рис. 7 а). Инструментарий модуля APM FEM выполняет КЭ-ю разбивку в автоматизированном режиме с возможностью уточнить размер КЭ.

По результатам КЭ-анализа получена картина распределения эквивалентных напряжений Мизеса, представленная на рис. 7 б. Локация очага напряжений на карте напряжений соответствует локации области, в которой начинается процесс разрушения FDM-образца в ходе натурального эксперимента (см. рис. 6 с).

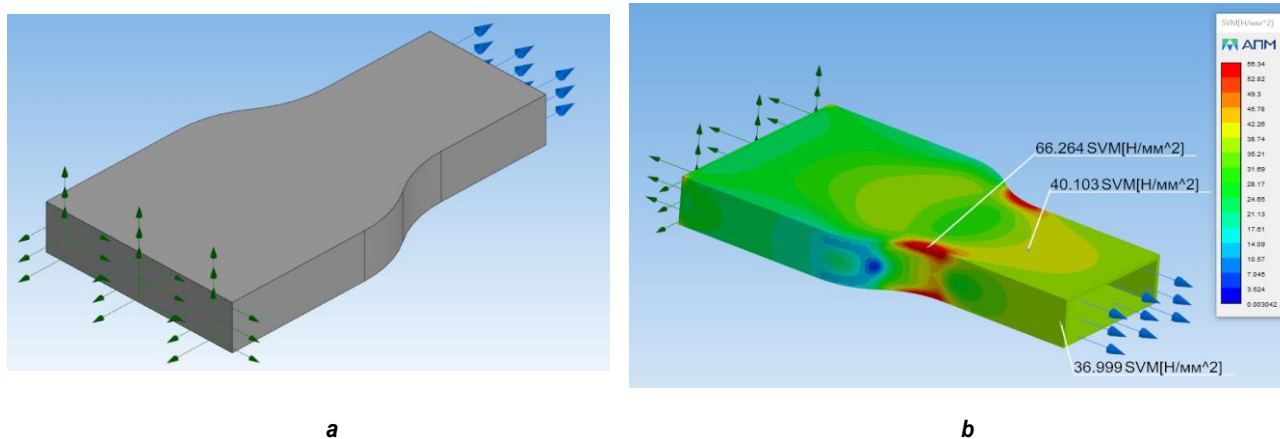


Рис. 7. Модель образца с утолщением в автоматизированной среде КОМПАС-3D: а – модель для конечно-элементного анализа; б – карта напряжений Мизеса
Fig. 7. Model of a sample with a thickening in COMPASS-3D automated environment: a – finite element analysis model; b – Mises stress map

Требуется усиление корпуса образца в слабой зоне. Очевиден тот факт, что наличие внешних галтелей в рассматриваемом образце не позволит сместить активность напряжений в рабочую часть образца. В связи с этим принято решение рассмотреть геометрию образца с постоянной шириной по всей длине, то есть форму прямоугольного параллелепипеда. С учетом технологических особенностей FDM-печати усиление образца в области захватов предложено обеспечивать за счет утолщения боковых стенок корпуса (рис. 8 а). На данном этапе для формирования технологической модели были приняты размеры внутренних утолщений стенок корпуса, представленные на рис. 8 б. Все толщины стенок корпуса заданы кратными принятой толщине одного прохода экструдера. Поэтому толщина стенки корпуса в рабочей части образца составляет 1,2 мм, то есть три прохода, каждый шириной по 0,4 мм. Иначе говоря, стенки корпуса рабочей части образца состоят из трех вертикальных слоев. Причем траектория укладки нити печати при формировании каждого вертикального слоя стенки идет по внешней геометрии образца (рис. 8 б). Значит, мезоконцентраторы, обусловленные изменением траектории, отсутствуют на внешнем контуре. Траектории укладки нити печати внутренних утолщений локализованы в областях зоны фиксации образца в захватах.

Важным параметром внутренней геометрии рассматриваемого FDM-образца является

радиус внутренней галтели $R_{\text{перех}}$. Следует определить величину этого радиуса, при которой параметры напряженного состояния в окрестности галтели позволят получить приоритет восприятия растягивающей силы рабочей части образца. В качестве параметра напряженного состояния по-прежнему рассматриваются напряжения Мизеса.

Для решения данной задачи задействовано приложение «Оптимизация IOSO-K» системы КОМПАС-3D. В работе приложения «Оптимизация IOSO-K» использовался режим «Параметрия». Соответственно, применительно к рассматриваемому случаю, в качестве варьируемого параметра принят радиус галтели $R_{\text{перех}}$, мм (см. рис. 8 б), значит, выходным параметром является максимальная величина эквивалентных напряжений Мизеса $\sigma_{\text{эквМ}}$, МПа.

Поскольку условия закрепления и условия нагружения модели образца остались прежними, процесс исследования, как и в предыдущем случае, осуществляется на модели половины образца (рис. 9 а). Внесено изменение в значение растягивающей нагрузки, поскольку толщина стенок корпуса рабочей части образца увеличилась с 0,8 мм до 1,2 мм. Для того чтобы напряжения в этой части модели не изменились по сравнению с моделью прототипа и составляли 36 МПа, значение нагрузки задано равным 2800 Н. На рис. 9 б приведена КЭ-я модель образца с глубиной просмотра 10%.

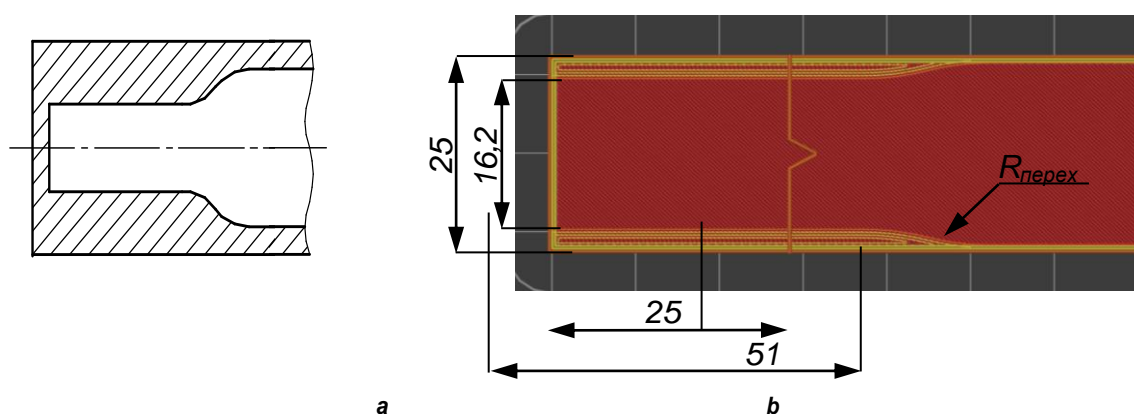


Рис. 8. Геометрия образца с внутренней галтелью в области перехода:
а – концептуальное представление геометрии образца без внешнего утолщения;
б – технологическая модель образца с внутренним утолщением в зоне захватов

Fig. 8. Geometry of the sample with an internal fillet in the transition area: а – conceptual representation of the sample geometry without external thickening; б – technological model of the sample with internal thickening in the gripping zone

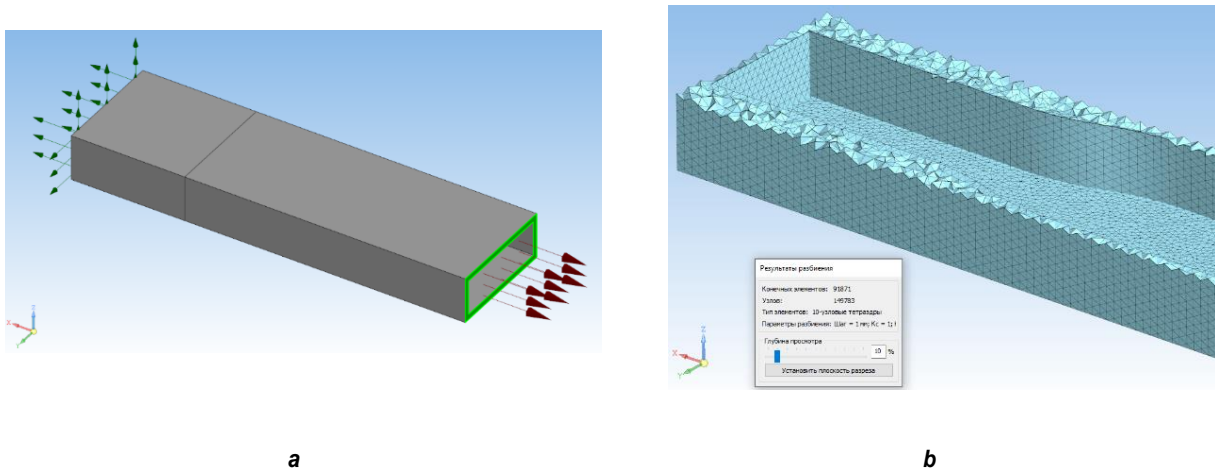


Рис. 9. Модель для конечно-элементного анализа образца в форме параллелепипеда:
a – 3d-модель с граничными условиями; b – КЭ-я модель
Fig. 9. Finite element analysis model for a parallelepiped sample:
a – 3d model with boundary conditions; b – finite element model

Диапазон значений варьируемого параметра $1 \text{ мм} \leq R_{\text{перех}} \leq 30 \text{ мм}$ (рис. 10) с шагом 1 мм. Соответственно, количество итераций – 30. Выбор диапазона обусловлен особенностями FDM-печати, требованиями к размерам образца, возможностью получить функциональную зависимость, достаточную для рационального выбора значения $R_{\text{перех}}$.

По результатам итерационного процесса получен массив данных, графическая интерпретация которого представлена на рис. 11 а. Она отчетливо показывает устойчивую тенденцию понижения максимальных значений напряжений с ростом значения радиуса галтели. Однако имеет место значительный разброс по точкам. В данном случае он обусловлен нестабильностью КЭ-й аппроксимации в зоне галтели при изменении значения радиуса галтели, возможностями автоматизированной САД-системы КОМПАС-3D.

Для получения стабильной зависимости данный массив точек был аппроксимирован

гладкой кривой. Возможности редактора Microsoft Office Excel позволили аппроксимировать массив точек полиномиальной кривой третьего порядка, для которой величина достоверности аппроксимации R^2 близка к единице (рис. 11 б). Повышение точности аппроксимирующей функции не имеет смысла, поскольку точность аппроксимируемых данных находится на уровне упрощенной математической модели. При этом тенденция изменения напряжений ясна. Кривая показывает стабильное сокращение максимального значения напряжений без асимптотического приближения к горизонтальной линии. То есть теоретически можно понизить напряжения до требуемого уровня, но при этом значительно увеличится радиус галтели. Увеличение радиуса приводит к увеличению продольного размера образца, что нежелательно. Одним из факторов, ограничивающих этот рост, являются технические возможности испытательной машины.

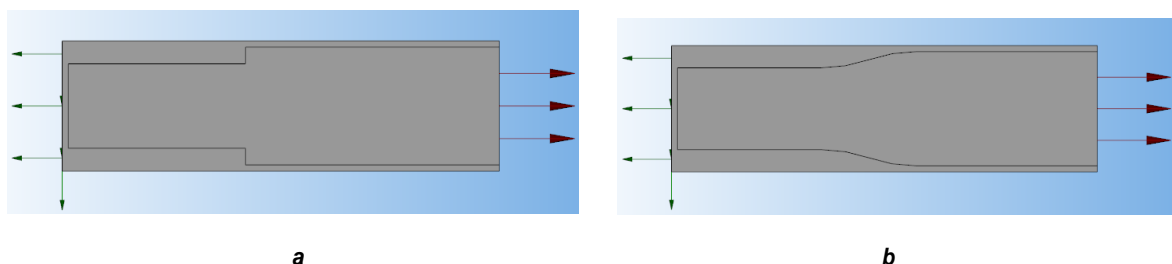


Рис. 10. Модели образца с предельными значениями радиуса галтели: a – $R_{\text{перех}} = 1 \text{ мм}$; b – $R_{\text{перех}} = 30 \text{ мм}$
Fig. 10. Models of a sample with limiting values of the fillet radius: a – $R_{\text{перех}} = 1 \text{ мм}$; b – $R_{\text{перех}} = 30 \text{ мм}$

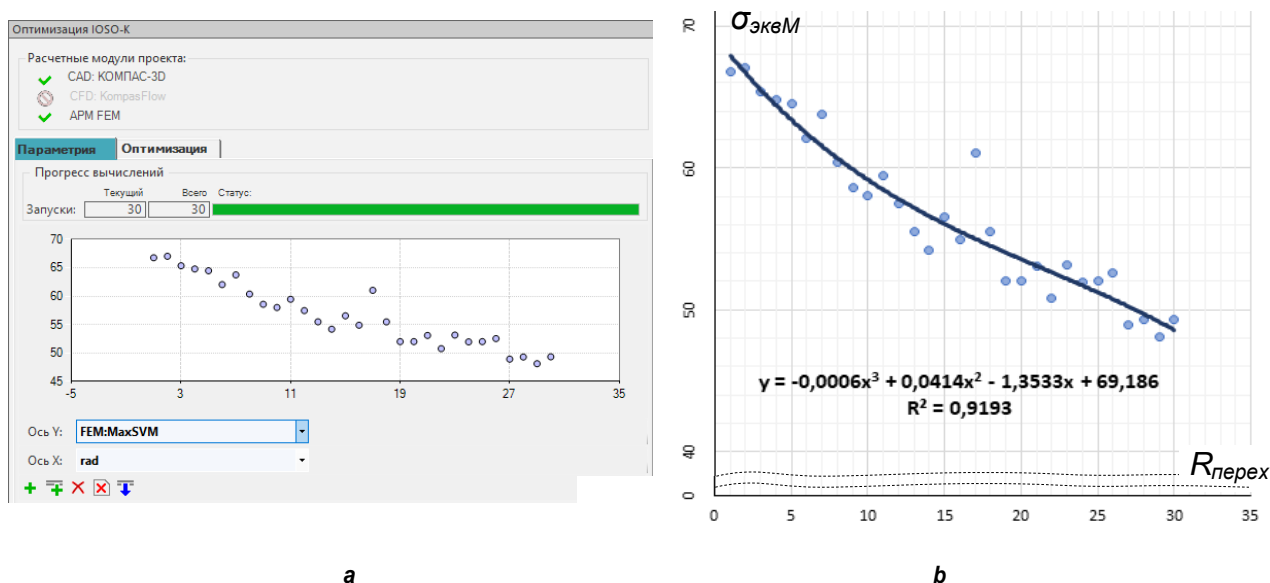


Рис. 11. Данные о зависимости $\sigma_{эквМ}$ от $R_{перех}$ по результатам параметрического анализа: а – информационное окно приложения «Оптимизация IOSO-K» по итогам анализа; б – аппроксимация данных гладкой зависимостью
 Fig. 11. Data on $\sigma_{эквМ}$ dependence on $R_{перех}$ by the parametric analysis results: а – information window of the "Optimization of IOSO-K" application according to the analysis results; б – data approximation by a smooth dependence

С учетом данных о зависимости $\sigma_{эквМ}$ от $R_{перех}$ по результатам параметрического анализа (см. рис. 11 б), фактора влияния FDM-структуры на способность корпуса образца воспринимать растягивающую нагрузку (рис. 12), специфики технологии FDM-печати и отчасти профессиональной проницательности авторов приняты размеры и внутренняя геометрия разрабатываемого образца. Радиус галтели решено принять равным 22 мм, продольный размер образца – увеличить от 150 мм (образец-прототип, см. рис. 4) до 180 мм.

Тем самым становится больше длина рабочей части образца. Это обусловлено отсутствием полного понимания влияния граничных условий на поведение FDM-структуры в рабочей части под нагрузкой. Нет ясности относительно того, как в данном случае интерпретировать принцип Сен-Венана. Как правило, геометрия сплошных образцов разрабатывается с его учетом. Это отдельная задача, решение которой предусмотрено на следующем этапе исследования.

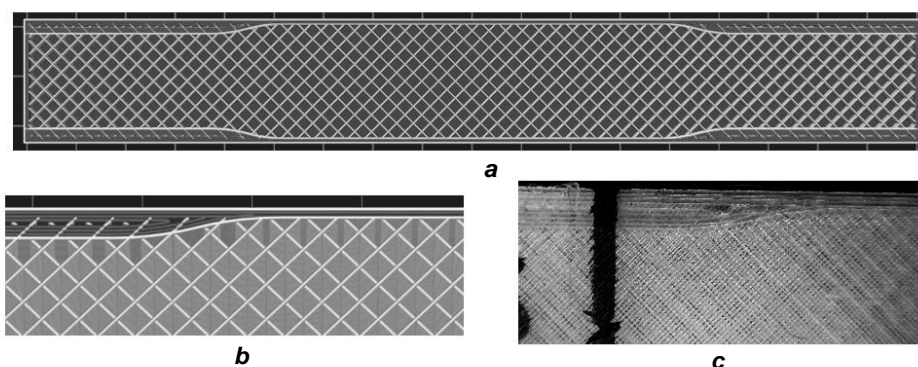


Рис. 12. Разработанный FDM-образец для испытаний на растяжение: а – вскрытая технологическая модель образца с заполнением 15%; б – фрагмент 3d-модели FDM-структуры образца в области внутренней галтели; в – фрагмент напечатанного образца в области внутренней галтели
 Fig. 12. Developed FDM sample for a tensile test: а – an opened technological model of the sample with 15% filling; б – a fragment of a 3d model of the FDM structure sample in the area of the inner fillet; в – a fragment of a printed sample in the area of the inner fillet

По итогам проделанной работы построен эскиз корпуса FDM-образца, представленный на рис. 13.

В соответствии с данным эскизом, сформированной на подготовительном этапе технологической моделью и изготовленным пробным FDM-образцом (см. рис. 12 с) была подготовлена серия из 10 образцов (рис. 14 а).

Испытания данных образцов показали устойчивый положительный результат. Разрушения всех образцов произошли в рабочей зоне (рис. 14 б). Иными словами, поставленная цель данного этапа разработки достигнута: удалось получить геометрические параметры FDM-образца для шаблона печати «линии» с заполнением 15%, обеспечиваю-

щие его корректное поведение при центральном растяжении. Безусловно, необходим анализ этой геометрии на предмет ее применимости ко всему указанному ранее диапазону значений невысокого процента заполнения, то есть от 50% и ниже. Предел «ниже» также подлежит уточнению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы геометрия и размеры образца-прототипа претерпели значительные изменения с поправкой на специфику FDM-печати. Данные изменения позволили скорректировать градиенты напряжений в зоне концентратора напряжений таким образом, чтобы обеспечить чистоту исследуемых процессов в рабочей зоне

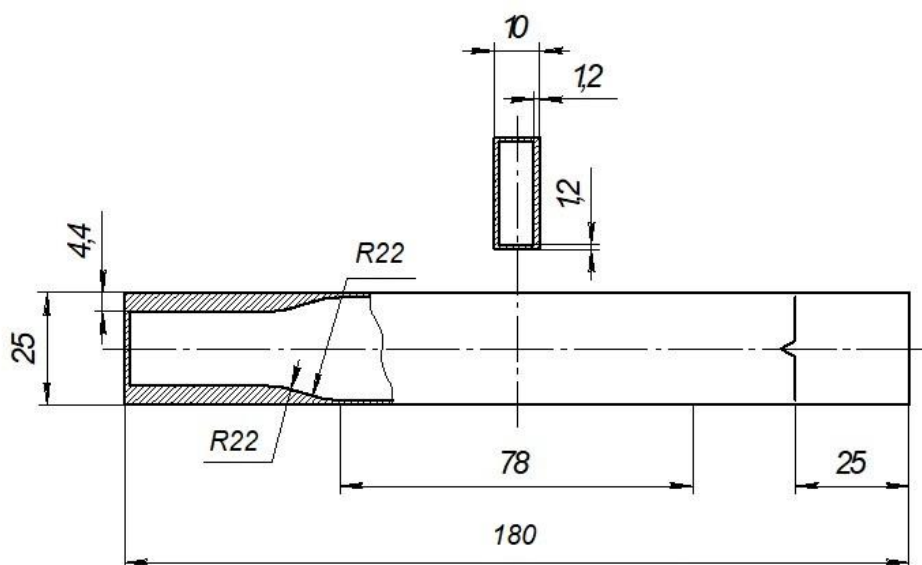


Рис. 13. Эскиз корпуса разработанного FDM-образца
Fig. 13. Design of the body of the developed FDM sample

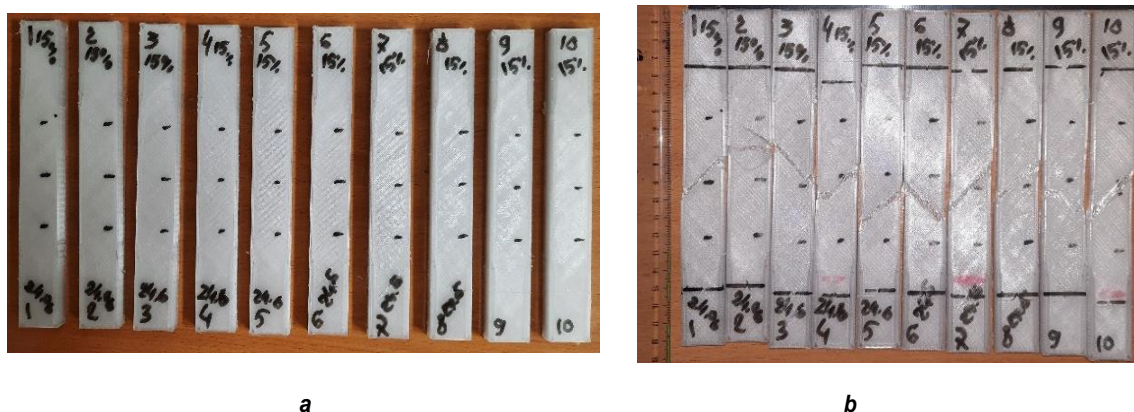


Рис. 14. Образцы для испытаний на растяжение: а – образцы до испытаний; б – образцы после испытаний
Fig. 14. Tensile test samples: a – pre-test samples; b – samples after testing

образца. Данный этап разработки FDM-образца с обозначенными параметрами почитался завершенным, как только натурные испытания показали стабильно желаемый результат. В ходе работы была определена общая тенденция зависимости распределения силового потока по объему образца от сочетания траектории укладки нити печати с внутренней и внешней геометриями образца.

Следующим этапом работы запланирована формализация полученных результатов. Требуется подвести обоснованную теоретическую базу, позволяющую увязать шаблон печати, процент заполнения, толщину внешней оболочки, параметры печати, характеристики материала филамента и геометрию образца.

Список источников

1. Nath S. D., Nilufar S. An Overview of additive manufacturing of polymers and associated composites // *Polymers*. 2020. Vol. 12. Iss. 11. P. 2719. <https://doi.org/10.3390/polym12112719>.
2. Петрова Г. Н., Ларионов С. А., Сорокин А. Е., Сапего Ю. А. Современные способы переработки термопластов // *Труды ВИАМ*. 2017. № 11. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-11-7-7>.
3. Weng Zixiang, Wang Jianlei, Senthil T., Wu Lixin. Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing // *Materials & Design*. 2016. Vol. 102. P. 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.045>.
4. Divyathej M. V., Varun M., Rajeev P. Analysis of mechanical behavior of 3D printed ABS parts by experiments // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016. Vol. 7. Iss. 3. P. 116–124.
5. Сабсай О. Ю., Чалая Н. М. Технологические свойства термопластов (обзор) // *Пластические массы*. 1992. № 1. С. 5–13.
6. Hanaphy P. 3D Printing industry news sliced: Velo3D, Xerox, Weta Workshop, MyMiniFactory and more [Электронный ресурс]. URL: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-industry-news-sliced-velo3d-xerox-weta-workshop-myminifactory-and-more-213448/> (08.02.2022).
7. Попадюк С. От протезов до оснастки: 3D-печать термопластами и композитами на их основе [Электронный ресурс]. URL: https://blog.iqb.ru/rec-thermoplastics-composites/?utm_source=getresponse&utm_medium=email (08.02.2022).
8. Raspopina V., Perelygina A., Shemetov L., Grigorov P. Dependence between the mechanical characteristics of the material and the FDM sample made from this material // *Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering* / eds. A. Bieliatynskiy, V. Breskich. Cham: Springer, 2022. P. 215–227. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_18.
9. Anitha R., Arunachalam S., Radhakrishnan P. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling // *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. Vol. 118. Iss. 1-3. P. 385–388. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00980-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00980-3).
10. Варнавский А. Н., Гадельшин А. Р., Салин Д. С. Исследование влияния показателей печати на качество и соотношение цена/качество результата изготовления изделий на бюджетном 3d-принтере // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2018. Т. 3. № 12. С. 124–131. https://doi.org/10.12737/article_5c1c9969a10128.83957539.
11. Sood A. K., Ohdar R. K., Mahapatra S. S. Improving dimensional accuracy of fused deposition modelling processed part using grey Taguchi method // *Materials & Design*. 2009. Vol. 30. Iss. 10. P. 4243–4252. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.04.030>.
12. Кузьмин А. А., Яблокова М. А. Выбор допускаемых напряжений при расчете на прочность деталей из пластмасс // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 8-2. С. 242–246.
13. Cantrell J., Rohde S., Damiani D., Gurnani R., DiSandro L., Anton J., et al. Experimental characterization of the mechanical properties of 3D printed ABS and polycarbonate parts // *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics, Volume 3. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series* / eds. S. Yoshida, L. Lamberti, C. Sciammarella. Cham: Springer, 2017. Vol. 3. P. 89–105. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41600-7_11.
14. Tronvoll S. A., Welo T., Elverum C. W. The effects of voids on structural properties of fused deposition modelled parts: a probabilistic approach // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97. P. 3607–3618. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2148-x>.
15. Kovan V., Tezel T., Camurlu H. E., Topal E. S. Effect of printing parameters on mechanical properties of 3D printed PLA/carbon fibre compos // *Materials Science. Non-Equilibrium Phase Transformations*. 2018. Iss. 4. P. 126–128.
16. Yoojung Han, Jongjun Kim. A Study on the mechanical properties of knit fabric using 3D printing - focused on PLA, TPU Filament- // *Journal of Fashion Business*. 2018. Vol. 22. Iss. 4. P. 93–105. <https://doi.org/10.12940/jfb.2018.22.4.93>.
17. Wu Wenzheng, Ye Wenli, Geng Peng, Wang Yulei, Li Guiwei, Hu Xue, et al. 3D printing of thermoplastic PI and interlayer bonding evaluation // *Materials Letters*. 2018. Vol. 229. P. 206–209. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.07.020>.
18. Wu Wenzheng, Geng Peng, Li Guiwei, Zhao Di, Zhang Haibo, Zhao Ji. Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-Printed

PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS // *Materials*. 2015. Vol. 8. Iss. 9. P. 5834–5846. <https://doi.org/10.3390/ma8095271>.

19. Huynh Nha Uyen, Smilo Jordan, Blourchian Aryan, Karapetian A. V., Youssef G. Property-map of epoxy-treated and as-printed polymeric additively manufactured materials // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020. Vol. 181. P. 105767. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105767>.

20. Avdeev A, Shvets A, Gushchin I, Torubarov I, Drobotov A, Makarov A, et al. Strength increasing additive manufacturing fused filament fabrication technology, based on spiral toolpath material deposition // *Machines*. 2019. Vol. 7. Iss. 3. P. 57. <https://doi.org/10.3390/machines7030057>.

21. Петров В. М., Безпальчук С. Н., Яковлев С. П. О влиянии структуры на прочность изделий из пласти-

ков, получаемых методом 3D-печати // Вестник Государственного университета и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2017. Т. 9. № 4. С. 765–776. <https://doi.org/1021821/2309-5180-2017-9-4-765-776>.

22. Ni Fei, Wang Guangchun, Zhao Haibin. Fabrication of water-soluble poly(vinyl alcohol)-based composites with improved thermal behavior for potential three-dimensional printing application // *Journal of Applied Polymer Science*. 2017. Vol. 134. Iss. 24. <https://doi.org/10.1002/app.44966>.

23. Фролов Д. А., Гаврилова А. О., Распопина В. Б. Численный эксперимент: анализ напряженного состояния в характерных точках FDM-структуры // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы СХ Международной научно-технической конференции (г. Иркутск, 2–4 июня 2021 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2021. С. 160–167.

References

1. Nath S. D., Nilufar S. An overview of additive manufacturing of polymers and associated composites. *Polymers*. 2020;12(11):2719.

<https://doi.org/10.3390/polym12112719>.

2. Petrova G. N., Larionov S. A., Sorokin A. E., Sapego Yu. A. *Modern ways of processing of thermoplastics. Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*. 2017;11. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-11-7-7>.

3. Weng Zixiang, Wang Jianlei, Senthil T., Wu Lixin. Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing. *Materials & Design*. 2016;102:276-283. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.045>.

4. Divyathej M. V., Varun M., Rajeev P. Analysis of mechanical behavior of 3D printed ABS parts by experiments. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016;7(3):116-124.

5. Sabsaj O. Yu., Chalaya N. M. Technological properties of thermoplastics (review). *Plasticheskie massy*. 1992;1:5-13. (In Russ.).

6. Hanaphy P. 3D Printing industry news sliced: Velo3D, Xerox, Weta Workshop, MyMiniFactory and more. Available from: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-industry-news-sliced-velo3d-xerox-weta-workshop-myminifactory-and-more-213448/> [Accessed 8th February 2022].

7. Popadyuk S. From prostheses to tooling: 3D printing with thermoplastics and thermoplastic composites. Available from: https://blog.iqb.ru/rec-thermoplastics-composites/?utm_source=getresponse&utm_medium=email [Accessed 8th February 2022].

8. Raspopina V., Perelygina A., Shemetov L., Grigorov P. Dependence between the mechanical characteristics of the material and the FDM sample made from this material. In: Bieliatynskiy A., Breskich V. (eds.). *Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer; 2022, p. 215-227. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_18.

9. Anitha R., Arunachalam S., Radhakrishnan P. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;118(1-3):385-388.

[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00980-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00980-3).

10. Varnavsky A. N., Gadelshin A. R., Salin D. S. The research of printing parameters impact on quality and price/quality ratio of the product's printing result on a budget 3D-printer. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuhova = Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*. 2018;3(12):124-131. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_5c1c9969a10128.83957539.

11. Sood A. K., Ohdar R. K., Mahapatra S. S. Improving dimensional accuracy of fused deposition modelling processed part using grey Taguchi method. *Materials & Design*. 2009;30(10):4243-4252. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.04.030>.

12. Kuzmin A. A., Yablokova M. A. The selection of the allowable stress when calculating the strength of plastic part. *Sovremennii naukoemkie tehnologii = Modern high technologies*. 2016;8-2:242-246. (In Russ.).

13. Cantrell J., Rohde S., Damiani D., Gurnani R., DiSandro L., Anton J., et al. Experimental characterization of the mechanical properties of 3D printed ABS and polycarbonate parts. In: Yoshida S., Lamberti L., Sciammarella C. (eds.). *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics, Volume 3. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Cham: Springer; 2017, vol. 3, p. 89-105. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41600-7_11.

14. Tronvoll S. A., Welo T., Elverum C. W. The effects of voids on structural properties of fused deposition modelled parts: a probabilistic approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;97:3607-3618. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2148-x>.

15. Kovan V., Tezel T., Camurlu H. E., Topal E. S. Effect of printing parameters on mechanical properties of 3D printed PLA/carbon fibre compos. *Materials Science. Non-Equilibrium Phase Transformations*. 2018;4:126-128.

16. Yoojung Han, Jongjun Kim. A study on the mechanical properties of knit fabric using 3D printing – focused on PLA, TPU filament-. *Journal of Fashion Business*. 2018;22(4):93-105. <https://doi.org/10.12940/jfb.2018.22.4.93>.

17. Wu Wenzheng, Ye Wenli, Geng Peng, Wang Yulei, Li

Guiwei, Hu Xue, et al. 3D printing of thermoplastic PI and interlayer bonding evaluation. *Materials Letters*. 2018;229:206-209.

<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.07.020>.

18. Wu Wenzheng, Geng Peng, Li Guiwei, Zhao Di, Zhang Haibo, Zhao Ji. Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS. *Materials*. 2015;8(9):5834-5846. <https://doi.org/10.3390/ma8095271>.

19. Huynh Nha Uyen, Smilo Jordan, Blourchian Aryan, Karapetian A. V., Youssef G. Property-map of epoxy-treated and as-printed polymeric additively manufactured materials. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020;181:105767.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105767>.

20. Avdeev A, Shvets A, Gushchin I, Torubarov I, Drobotov A, Makarov A, et al. Strength increasing additive manufacturing fused filament fabrication technology, based on spiral toolpath material deposition. *Machines*. 2019;7(3):57. <https://doi.org/10.3390/machines7030057>.

21. Petrov V. M., Bezpал'chuk S. N., Yakovlev S. P. 3D-printing from plastics: inner structure influence on the strength. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 2017;9(4):765-776. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776>.

22. Ni Fei, Wang Guangchun, Zhao Haibin. Fabrication of water-soluble poly(vinyl alcohol)-based composites with improved thermal behavior for potential three-dimensional printing application. *Journal of Applied Polymer Science*. 2017;134(24). <https://doi.org/10.1002/app.44966>.

23. Frolov D. A., Gavrilova A. O., Raspopina V. B. Numerical experiment: analysis of the stress state at the characteristic points of the FDM structure. In: *Bezopasnost' koleznykh transportnykh sredstv v usloviyah ekspluatatsii: materialy CX Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Safety of wheeled vehicles in operation: Proceedings of the 110th International Scientific and Technical Conference*. 2–4 June 2021, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2021, p. 160-167. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шеметов Лев Игоревич,

студент,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Распопина Вера Борисовна,

кандидат технических наук, доцент,

доцент кафедры самолетостроения и эксплуатации авиационной техники,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Чернышков Антон Сергеевич,

аспирант,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Вклад авторов

Шеметов Л. И. проводил натурные испытания и численные эксперименты в автоматизированной среде с последующим анализом и систематизацией выходных данных; формировал технологические модели.

Распопина В. Б. руководит проектом, осуществляла аналитику теоретической и экспериментальной базы; участвовала в проведении натурных экспериментов; систематизировала материал.

Чернышков А. С. осуществлял техническое обеспечение технологической составляющей исследования.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lev I. Shemetov,

Student,

Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Vera B. Raspopina,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,

Associate Professor of the Department of Aircraft Engineering and Operation of Aviation Equipment, Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Anton S. Chernyshkov,

Postgraduate Student,

Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Contribution of the authors

Shemetov L.I. carried out field tests and numerical experiments in an automated environment with the following analysis and systematization of the output data, created technological models as well.

Raspopina V. B. was responsible for the management of the project, carried out the analysis of the theoretical and experimental base, participated in field experiments and organized the material.

Chernyshkov A. S. provided technical support for the technological component of the study.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.08.2022; одобрена после рецензирования 31.08.2022; принята к публикации 26.09.2022.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 01.08.2022; approved after reviewing 31.08.2022; accepted for publication 26.09.2022.



Научная статья

УДК 621.311

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-401-414>

Оценка эффективности метода двух измерений при определении параметров схем замещения элементов электрической сети для высших гармонических составляющих токов и напряжений

Евгений Олегович Анненков¹, Екатерина Васильевна Зубова²,
Алексей Спартакович Селезнев³, Денис Сергеевич Федосов⁴

¹⁻⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

¹kejo@yandex.ru

²zubova@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-0914-2027>

³seleznevas.ru@mail.ru

⁴fedosov_ds@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0001-5989-9549>

Резюме. Целью работы является анализ корректности применения метода двух измерений при определении параметров схем замещения элементов электрической сети для высших гармонических составляющих. Исследования проведены на имитационной модели точки общего присоединения в MATLAB Simulink, включающей в себя искажающую нагрузку в виде трехфазного выпрямителя, неискажающую линейную нагрузку и обобщенную энергосистему без источников искажений. Параметры схемы замещения в виде активных двухполюсников, состоящих из источника тока искажения и проводимости, определялись с помощью метода двух измерений параметров режима. Рассмотрены режимы с изменением активных и реактивных мощностей исследуемой искажающей нагрузки и нагрузок во внешней электрической сети. Установлено, что результаты определения параметров схемы замещения при изменении мощности нагрузки на 20% и более являются нестабильными (разброс до 400% от фактических значений). Следовательно, данные значения параметров не являются достоверными, так как зависят от величины мощности внешней нагрузки. Вместе с тем имитация случайного изменения параметров нагрузок в пределах 10% от начального значения позволила корректно определить параметры схемы замещения. Показано, что схема замещения неискажающей линейной нагрузки всегда состоит только из проводимости, в то же время в схеме замещения искажающей нагрузки может присутствовать ненулевая проводимость на рассматриваемой гармонической составляющей. Таким образом, установлено, что метод двух измерений будет давать приемлемые по точности результаты (отклонение от фактических значений менее 1%) не при разовом изменении параметров режима на существенную величину, а при непрерывном контроле малых естественных изменений параметров режима электроэнергетической системы. Результаты исследования представляют интерес при решении задачи оценки влияния потребителей на качество электроэнергии в реальном времени, поскольку исходными данными для последней задачи являются параметры схемы замещения.

Ключевые слова: качество электрической энергии, несинусоидальность напряжения, высшие гармоники, метод двух измерений, метод эквивалентного генератора, схема замещения, активный двухполюсник, MATLAB Simulink

Финансирование: Исследования выполнены при финансовой поддержке по гранту государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект No FZZS-2020-0039).

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

Effectiveness of the method of two measurements in determining the parameters of equivalent circuits of electrical network elements for the highest harmonic components of currents and voltages

Evgeniy O. Annenkov¹, Ekaterina V. Zubova², Aleksey S. Seleznev³, Denis S. Fedosov^{✉4}

¹⁻⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

¹kejo@yandex.ru

²zubova@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-0914-2027>

³seleznevas.ru@mail.ru

⁴fedosov_ds@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0001-5989-9549>

Abstract. The feasibility of applying the method of two measurements in determining the parameters of equivalent circuits of electrical network elements for the highest harmonic components is analyzed. Experiments were carried out using a MATLAB Simulink model of the common coupling point that includes a distorting load in the form of a three-phase rectifier, a nondistorting linear load and a generalized power system without distortion sources. The parameters of an equivalent circuit in the form of active bipoles, consisting of current distortion and conductivity sources, were determined using the method of two measurements of mode parameters. Modes with variations in the active and reactive power of the studied distorting load and loads in the external electrical network were considered. The results of determining the equivalent circuit parameters under 20% and more variations in the power loading were established to be unstable (400% dispersion of actual values). Therefore, these parameter values appear to be unreliable due to their dependence on the value of external load power. At the same time, the simulation of random variations in loading parameters within 10% of the initial value allowed the parameters of an equivalent circuit to be correctly determined. It was shown that the equivalent circuit of a nondistorting linear load consists solely of conductivity, while the equivalent circuit of a distorting load can contain non-zero conductivity on the considered harmonic component. Thus, according to the performed study, the method of two measurements produces the results acceptable in terms of accuracy (deviation from actual values of less than 1%) not at a single significant variation in the mode parameters, but during a continuous monitoring of small natural variations in the parameters of the electric power system. The results obtained can be used when solving the problem of online assessing the effect of loads on the quality of electricity, since the initial data for this problem include the equivalent circuit parameters.

Keywords: electric power quality, voltage waveform distortion, higher harmonics, two-measurement method, Thévenin's theorem, equivalent circuit, active one-port device, MATLAB Simulink

Funding: The research was carried out with the financial support under a state assignment grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FZZS-2020-0039).

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

ВВЕДЕНИЕ

Рост числа и мощности нелинейных (искажающих) нагрузок в энергосистемах ведет к ухудшению качества электроэнергии [1, 2]. Несоответствие показателей качества электроэнергии требованиям ГОСТ 32144-2013⁵ приводит к увеличению потерь электроэнергии и мощности, сокращению срока службы электрооборудования и преждевременному выходу его из строя, что наносит существен-

ный экономический ущерб для энергосистемы [1, 3].

Улучшить ситуацию с качеством электроэнергии можно за счет применения организационных и технических мероприятий, предполагающих установку активных и пассивных фильтров гармоник [4], рассредоточение искажающих нагрузок, применение специальных схемных решений. Для реализации любого из перечисленных мероприятий требу-

⁵ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. от 25.03.2013. М.: Изд-во «Стандартинформ», 2014.

ется информация о параметрах схем замещения искажающих и неискажающих нагрузок на высших гармонических составляющих. Получить параметры схем замещения можно расчетным путем, однако это применимо только для единичных электроприемников с известными номинальными и режимными параметрами.

Если же рассматривается обобщенная нагрузка, состав и количество электроприемников которой неизвестны и/или постоянно меняются во времени, то единственным вариантом получения параметров схемы замещения являются экспериментальные методы, использующие периодические или непрерывные измерения параметров режима: токов и напряжений высших гармонических составляющих [5, 6].

Наиболее распространенным считается экспериментальный метод, имеющий условное название «метод двух измерений» или «метод двух режимов» [6–8]. Названный метод детально описан как в отечественных специализированных источниках [6, 8, 9], так и за рубежом [7, 10], есть примеры его применения [7, 11]. Однако ни в одной из перечисленных работ нет явного ответа на следующие вопросы: какова проводимость у искажающей нагрузки в схеме замещения для n -й гармонической составляющей и являются ли параметры схемы замещения, полученные методом двух измерений, автономными, т.е. не зависящими от режима внешней электрической сети.

Целью данной работы и является получение ответов на данные вопросы. В исследовании поставлены следующие задачи:

- 1) провести анализ метода эквивалентного генератора и схемы замещения в виде активного двухполюсника для представления искажающих нагрузок;
- 2) разработать модель точки общего присоединения в MATLAB Simulink и провести имитационное моделирование для определения параметров схем замещения;
- 3) выполнить анализ результатов определения параметров схемы замещения методом двух измерений при различных изменениях параметров режима.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа влияния обобщенных нагрузок на уровень n -х гармонических составляющих, получаемых в результате разложения токов и напряжений в ряд Фурье [12], широко используется метод эквивалентного генератора [13]. Согласно этому методу, сложные электрические цепи заменяются простой схемой замещения в виде источника электродвижущей силы (ЭДС) и сопротивления, включенными последовательно (рис. 1 а), либо источника тока и проводимости, включенными параллельно (рис. 1 б).

Совокупность источника ЭДС $\dot{E} = \dot{U}$ и сопротивления Z на рис. 1 а можно рассматривать как некоторый эквивалентный генератор, где Z является его внутренним сопротивлением, а напряжение U – величиной его ЭДС. Метод расчета тока в выделенной ветви, основанный на замене активного двухполюсника эквивалентным генератором, принято называть «методом эквивалентного генератора» (активного двухполюсника), а также «методом холостого хода» и «методом короткого замыкания» [13].

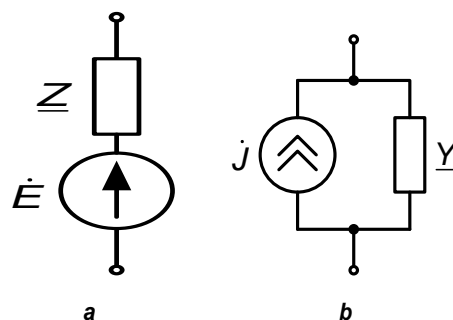


Рис. 1. Упрощенная схема замещения в виде последовательно соединенных источника электродвижущей силы и сопротивления (а) или источника тока и проводимости, включенных параллельно (б)

Fig. 1. Simplified equivalent circuit in the form of the source of electromotive force and impedance connected in series (a) or a current source and conductivity connected in parallel (b)

Для экспериментального определения входного сопротивления активного двухполюсника необходимо измерить напряжение холостого хода на зажимах разомкнутой ветви \dot{U} и ток короткого замыкания \dot{I}_k ветви, а

затем найти сопротивление \underline{Z} : $\underline{Z} = \dot{U} / \dot{i}_k$.

При анализе несинусоидальных режимов более распространенными являются схемы замещения в виде источника тока \underline{j} и проводимости \underline{Y} на рис. 1 б. Параметры данной схемы замещения могут быть получены по выражениям:

$$\underline{j} = \frac{\dot{E}}{\underline{Z}}; \quad \underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}, \quad (1)$$

где \underline{j} – ток искажения для n -й гармонической составляющей, который характеризует наличие у рассматриваемого электроприемника нелинейных элементов, искажающих форму напряжения; \underline{Y} – проводимость для n -й гармонической составляющей, отображающая наличие линейных нагрузок на рассматриваемом присоединении.

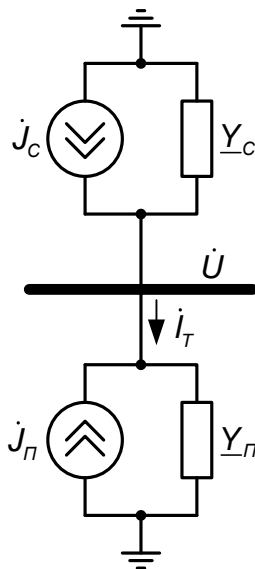


Рис. 2. Преобразованная схема замещения субъектов, подключенных к точке общего присоединения: J_n и Y_n – параметры схемы замещения нагрузок рассматриваемого потребителя, J_c и Y_c – параметры схемы замещения внешней энергосистемы и прочих нагрузок

Fig. 2. Modified equivalent circuit of subjects connected to the point of common coupling: J_n and Y_n – parameters of the equivalent circuit for considered consumer loads, J_c and Y_c – parameters of the equivalent circuit of external power system and other loads

Данные параметры схемы замещения двухполюсника (ток искажения \underline{j} и проводи-

мость \underline{Y}) могут быть также найдены по известному методу двух измерений [7–10]. На рис. 2 представлена упрощенная схема замещения точки общего присоединения, где \underline{j}_n и \underline{Y}_n – ток искажения и проводимость нагрузок исследуемого потребителя на n -й гармонической составляющей, \underline{j}_c и \underline{Y}_c – эквивалентные ток искажения и проводимость элементов остальных участников эквивалентной энергосистемы на n -й гармонической составляющей (питающей сети и иных потребителей, подключенных к данной точке общего присоединения) [14]. В схеме на рис. 2 представляется возможным измерять только два независимых параметра режима: напряжение искажения n -й гармонической составляющей в точке общего присоединения \dot{U} и ток искажения n -й гармонической составляющей \dot{i}_T на присоединении потребителя.

Если измерить указанные параметры \dot{U} и \dot{i}_T в два различных момента времени, то, согласно [11], можно рассчитать экспериментальные значения тока искажения и проводимости по выражениям:

$$j_{\text{эксп}} = \frac{\dot{U}' \dot{i}_T'' - \dot{U}'' \dot{i}_T'}{\dot{U}'' - \dot{U}'}; \quad Y_{\text{эксп}} = \frac{\dot{i}_T'' - \dot{i}_T'}{\dot{U}'' - \dot{U}'}, \quad (2)$$

где \dot{U}' и \dot{i}_T' – напряжение искажения в точке общего присоединения и ток искажения, текущий от точки общего присоединения к потребителю при первом измерении; \dot{U}'' и \dot{i}_T'' – те же величины при втором измерении. Для двух измерений параметров режима возможны следующие четыре варианта [11]:

Вариант 1. За период времени между измерениями изменились параметры схемы замещения внешней системы \underline{j}_c и/или \underline{Y}_c , а параметры схемы замещения исследуемого потребителя \underline{j}_n и \underline{Y}_n остались неизменными. Из закона Ома и первого закона Кирхгофа для рис. 2 следует, что $\dot{i}_T = \dot{U} \underline{Y}_n - \dot{j}_n$. Тогда:

$$\begin{aligned} J_{\text{эксп}} &= \frac{\dot{U}'(\dot{U}''\underline{Y}_n - \dot{J}_n) - \dot{U}''(\dot{U}'\underline{Y}_n - \dot{J}_n)}{\dot{U}'' - \dot{U}'} = \\ &= \frac{\dot{U}''\dot{J}_n - \dot{U}'\dot{J}_n}{\dot{U}'' - \dot{U}'} = \dot{J}_n; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{\text{эксп}} &= \frac{\dot{U}''\underline{Y}_n - \dot{J}_n - (\dot{U}'\underline{Y}_n - \dot{J}_n)}{\dot{U}'' - \dot{U}'} = \\ &= \frac{\dot{U}''\underline{Y}_n - \dot{U}'\underline{Y}_n}{\dot{U}'' - \dot{U}'} = \underline{Y}_n. \end{aligned} \quad (4)$$

Значения величин $J_{\text{эксп}}$ и $\underline{Y}_{\text{эксп}}$ будут равны соответствующим значениям параметров схемы замещения исследуемого потребителя \dot{J}_n и \underline{Y}_n .

Вариант 2. За период времени между измерениями изменились параметры схемы замещения исследуемого потребителя, а параметры схемы замещения системы не менялись. Из закона Ома и первого закона Кирхгофа для рис. 2 $\dot{I}_T = \dot{J}_C - \dot{U}\underline{Y}_C$. Тогда:

$$\begin{aligned} J_{\text{эксп}} &= \frac{\dot{U}'(\dot{J}_C - \dot{U}''\underline{Y}_C) - \dot{U}''(\dot{J}_C - \dot{U}'\underline{Y}_C)}{\dot{U}'' - \dot{U}'} = \\ &= \frac{\dot{U}'\dot{J}_C - \dot{U}''\dot{J}_C}{\dot{U}'' - \dot{U}'} = -\dot{J}_C; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{\text{эксп}} &= \frac{\dot{J}_C - \dot{U}''\underline{Y}_C - (\dot{J}_C - \dot{U}'\underline{Y}_C)}{\dot{U}'' - \dot{U}'} = \\ &= \frac{\dot{U}'\underline{Y}_C - \dot{U}''\underline{Y}_C}{\dot{U}'' - \dot{U}'} = -\underline{Y}_C. \end{aligned} \quad (6)$$

Значения величин $J_{\text{эксп}}$ и $\underline{Y}_{\text{эксп}}$ равны соответствующим значениям параметров схемы замещения внешней системы \dot{J}_C и \underline{Y}_C , взятым с противоположным знаком.

Вариант 3. За период времени между измерениями параметры схемы замещения потребителя и системы не изменились. При этом $\dot{I}_T'' = \dot{I}_T'$, $\dot{U}'' = \dot{U}'$, следовательно, значения параметров схемы замещения $J_{\text{эксп}}$ и $\underline{Y}_{\text{эксп}}$ для такого случая получить невозможно.

Вариант 4. За период времени между измерениями изменились параметры схемы замещения, как системы, так и исследуемого потребителя. В этом случае упрощение выражений (2) невозможно, при этом нельзя определить параметры схемы замещения ни одного из присоединений.

Так как внешняя по отношению к рассматриваемому потребителю система имеет большее количество элементов, а значит, и более высокую вероятность изменения их параметров, то за время между двумя измерениями наиболее вероятно получить упомянутые выше варианты 1 или 4. При этом для определения параметров схемы замещения пригоден только вариант 1. Вместе с тем на математической модели можно принудительно сделать возможными изменения только параметров внешней системы, а значит, получать параметры только исследуемого потребителя по варианту 1.

Для решения поставленных в работе задач составлена имитационная модель точки общего присоединения в MATLAB Simulink [15, 16] (рис. 3 б). Электрическая схема моделируемой точки общего присоединения приведена на рис. 3 а.

В исходном режиме модель на рис. 3 имеет следующие параметры элементов:

1. Источник напряжения, моделирующий питающую систему **C**, с параметрами:
 - мощность трехфазного КЗ на шинах системы $S_{\text{КЗ}}^{(3)} = \sqrt{3}U_{\text{ном}}I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 15 \approx 260 \text{ МВА}$;
 - базисное напряжение $U_{\text{баз}} = 10 \text{ кВ}$;
 - соотношение индуктивного и активного сопротивлений $X_C / R_C = 3$.

2. Исследуемый потребитель с нелинейной искажающей нагрузкой, представленный трехфазным шестипульсным выпрямителем (VD1-6) [17] с подключенной к нему нагрузкой **H1** с параметрами:

- номинальное напряжение переменного тока $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$;
- активная мощность нагрузки на стороне постоянного напряжения $P_{\text{H1}} = 5 \text{ МВт}$;
- индуктивная мощность нагрузки на стороне постоянного напряжения (эквивалент

для частоты 50 Гц) $Q_{L,H1} = 2 \text{ МВ} \cdot \text{Ар}$;
– емкостная мощность нагрузки на стороне постоянного напряжения $Q_{C,H1} = 0 \text{ МВ} \cdot \text{Ар}$.

3. Внешняя по отношению к исследуемому потребителю нагрузка представлена линейной симметричной неискажающей нагрузкой **H2** с параметрами:
– номинальное напряжение переменного

тока $U_{НОМ} = 10 \text{ кВ}$;
– трехфазная активная мощность нагрузки $P_{H2} = 5 \text{ МВт}$;
– трехфазная индуктивная мощность нагрузки $Q_{L,H2} = 2 \text{ МВ} \cdot \text{Ар}$;
– трехфазная емкостная мощность нагрузки $Q_{C,H2} = 0 \text{ МВ} \cdot \text{Ар}$.

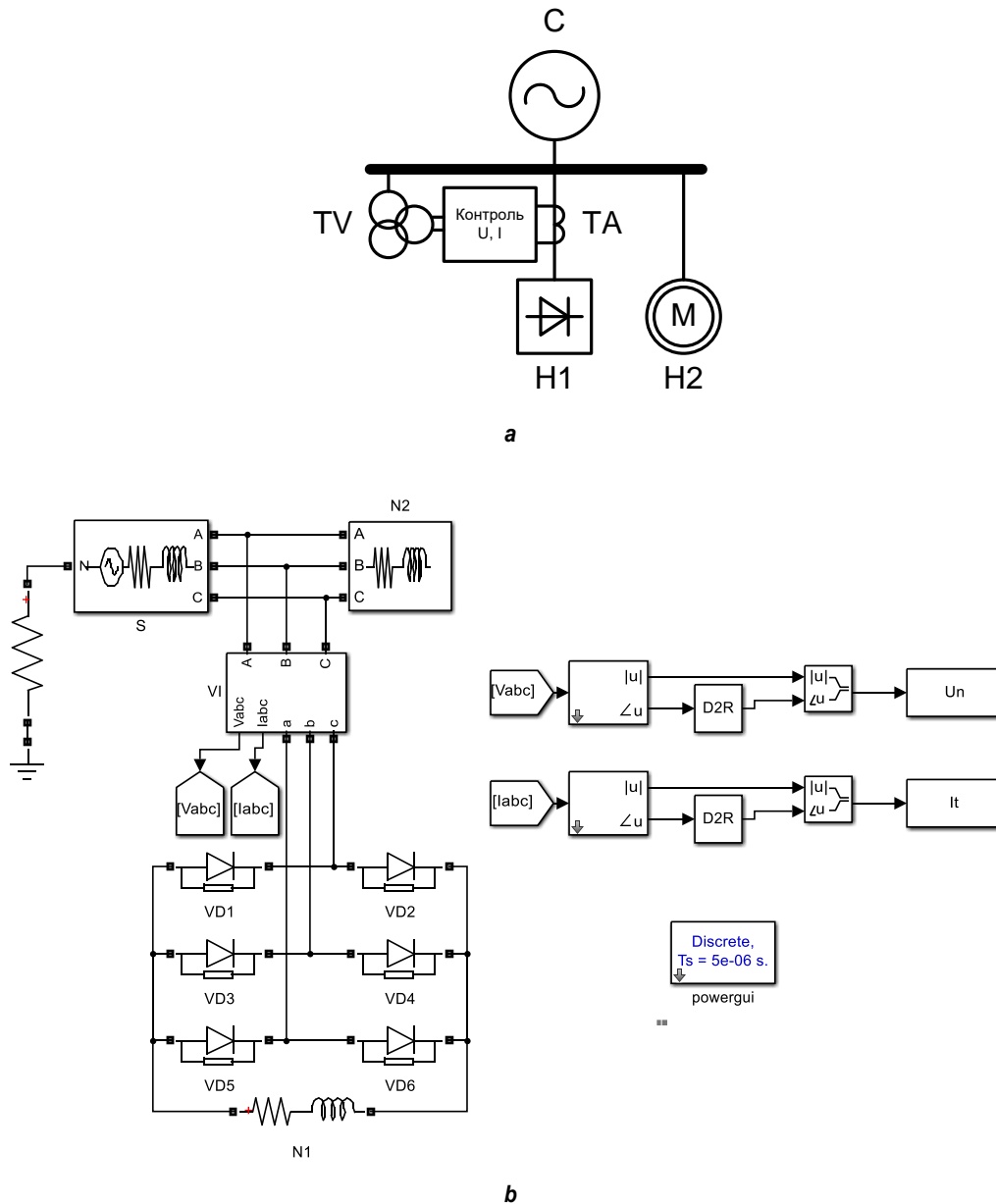


Рис. 3. Электрическая схема точки общего присоединения (а) и ее имитационная модель в среде MATLAB Simulink (b): H1 – искажающая нагрузка, H2 – неискажающая нагрузка, С – энергосистема, ТА – трансформатор тока, TV – трансформатор напряжения
Fig. 3. Electrical circuit of the point of common coupling (a) and its simulation model in MATLAB Simulink (b): H1 – distorting load, H2 – non-distorting load, C – power system, TA – current transformer, TV – voltage transformer

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментальной части работы рассматривались изменения активной и индуктивной мощностей нагрузок Н1 либо Н2 с целью определения параметров схем замещения по методу двух измерений для 5-й, 7-й, 11-й, 13-й гармонических составляющих. Далее в статье в качестве примера будут представлены результаты опытов только для 5-й гармонической составляющей, для остальных составляющих полученные закономерности идентичны.

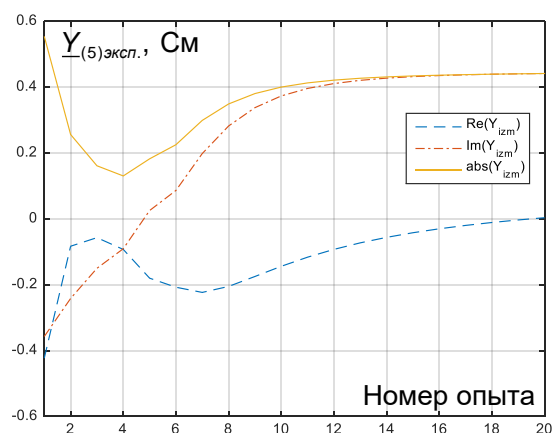
Экспериментальная работа состояла из двух частей:

В первой части экспериментальной работы выполнялось изменение мощности нагрузки Н2 (внешней по отношению к исследуемому потребителю Н1) и контроль напряжения гармонической составляющей \dot{U} и тока гармонической составляющей \dot{I}_T на присоединении потребителя Н1 (см. рис. 3 а). В результате данных экспериментов по выражениям (3) и (4) получены параметры нагрузки Н1.

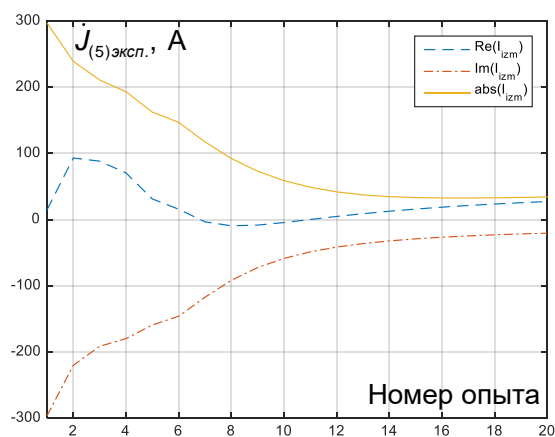
Во второй части экспериментальной работы изменяли параметры исследуемого потребителя Н1 при неизменных параметрах

нагрузки Н2 и внешней энергосистемы, при этом контролировали те же параметры \dot{U} и \dot{I}_T на присоединении того же потребителя с нагрузкой Н1. В результате были получены параметры схемы замещения внешней электрической сети (нагрузка Н2 и питающая система С) с противоположным знаком по формулам (5), (6).

Часть 1. В качестве первой задачи проведена серия из 20 опытов по поочередному изменению реактивной мощности нагрузки Н2 Q_{LH2} от начального значения 2 МВ·Ар до одной из величин следующего ряда: 0,01, 0,5, 1, 1,5, 2,5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 МВ·Ар. По расчетным значениям \dot{U} и \dot{I}_T в данных парах режимов (исходный режим с нагрузкой 2 МВ·Ар и новый режим с нагрузкой из указанного ряда мощностей) по выражениям (2) рассчитывались параметры схемы замещения исследуемого потребителя \dot{J}_n и \underline{Y}_n для 5-й гармонической составляющей (рис. 4). Изменяемая нагрузка Н2 является внешней по отношению к исследуемой нагрузке Н1, поэтому расчет по формуле (2) дает параметры схемы замещения нагрузки Н1, которая во всех 20 парах опытов в модели оставалась неизменной.



а



б

Рис. 4. Результаты определения активных, реактивных составляющих и модулей проводимости (а) и тока искажения (б) искажающей нагрузки Н1 для 5-й гармонической составляющей в результате серии из 20 опытов поочередного изменения реактивной мощности внешней нагрузки Н2: пунктирные линии – активная составляющая, штрихпунктирные линии – реактивная составляющая, сплошные линии – модуль величины
Fig. 4. Results of determining active, reactive components and absolute values of conductivity (a) and distortion current (b) of the distorting load Н1 for the 5th harmonic component as a result of a series of 20 experiments on alternating changes in the reactive power of the external load Н2: dashed lines – active component, dash-dot lines – reactive component, solid lines – absolute values

Как показывают графики на рис. 4, на результаты определения параметров схемы замещения существенно влияет то, на какую величину изменялась реактивная мощность внешней нагрузки. Например, результаты определения модуля проводимости фактически неизменной нагрузки варьируются в диапазоне от 0,14 См до 0,56 См в зависимости от того, на какую величину менялись параметры режима. Это не дает возможности достоверно определить собственные параметры схемы замещения искажающей нагрузки Н1.

Из рис. 4 также видно, что у искажающей нагрузки Н1 присутствует ненулевая проводимость на генерируемой ею 5-й гармонической составляющей. Данную проводимость не упоминают в специализированных источниках [18, 19], однако фактически ее требуется учитывать при проведении расчетов и анализа показателей качества электрической энергии.

Проведена подобная серия из 20 опытов по изменению мощности нагрузки Н2 с постоянным коэффициентом мощности ($\cos\varphi_{H2}$) данной нагрузки. Активная мощность нагрузки Н2 P_{H2} последовательно менялась от величины 5 МВт до одного из значений из ряда: 0,01, 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 МВт. Реактивная мощность нагрузки Н2 Q_{LH2} во всех опытах принималась равной 40% от активной мощности P_{H2} . Результаты определения параметров схемы замещения нагрузки Н1 для 5-й гармонической составляющей приведены на рис. 5.

Сравнение приведенных на рис. 4 и 5 графиков показывает, что изменение только реактивной мощности внешней нагрузки Н2 на большую величину (до нескольких МВ·Ар) приводит к изменению экспериментально определяемых параметров схемы замещения нагрузки Н1, которые должны были остаться постоянными. Если изменение нагрузки Н2 происходит с фиксированным $\cos\varphi_{H2}$, то результаты определения параметров схемы замещения нагрузки Н1 стабильны и слабо зависят от приращения мощности подключаемой нагрузки (колебания в пределах 8%).

Представляет также интерес, какими будут результаты определения параметров

схемы замещения при малых изменениях мощности внешней нагрузки Н2 – в пределах 10% от начального значения полной мощности. Проведена имитация случайного изменения реактивной мощности нагрузки Н2 с нормальным законом распределения отклонения, математическим ожиданием отклонения 0 МВ·Ар и диапазоном, $1\sigma = 0,1 S_{H2} = 0,539 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ где σ – среднеквадратичное отклонение [20]. Всего проведено 20 опытов изменения мощности на данную случайную величину, результаты определения параметров схемы замещения приведены на рис. 6.

В отличие от рис. 4, на графиках рис. 6 видно, что результаты определения параметров схемы замещения при изменении параметров режима на малую величину (в пределах 10%) стабильны и практически не зависят от диапазона изменения параметров внешних нагрузок. Представленные на рис. 5–6 графики вновь показывают наличие собственной ненулевой проводимости у искажающей нагрузки Н1, при этом, согласно теории [19, 20], проводимость такой нагрузки для токов высших гармонических составляющих должна быть нулевой.

Влияние диапазона изменения параметров режима на результат расчета параметров схемы замещения может быть обусловлено связью параметров режима на высших гармонических составляющих с режимом основной частоты, когда включение или отключение существенной реактивной мощности изменяет уровни напряжений и влияет одновременно на все гармонические составляющие, т.е. нарушает принцип суперпозиции, принятый при использовании разложения в ряд Фурье [12]. По этой причине использование метода двух измерений при больших изменениях параметров режима, как это предлагалось в [7], некорректно, поскольку параметры коммутируемой мощной нагрузки будут влиять на результат вычисления параметров схемы замещения.

Более корректным при определении параметров схемы замещения является использование малых, «естественных» изменений параметров режима, как это предложено в [11]. При этом стоит помнить, что погрешно-

сти измерений гармонических составляющих будут сопоставимы с полезными изменениями данных токов и напряжений. В работе [21] предложены варианты решения этой проблемы.

Часть 2. В данной части экспериментальной работы проведены опыты по определению параметров схемы замещения обобщенной внешней энергосистемы (источник питания С и нагрузка Н2), не имеющей

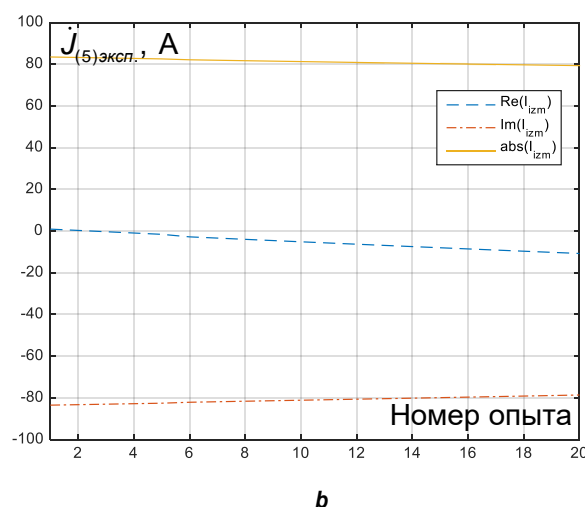
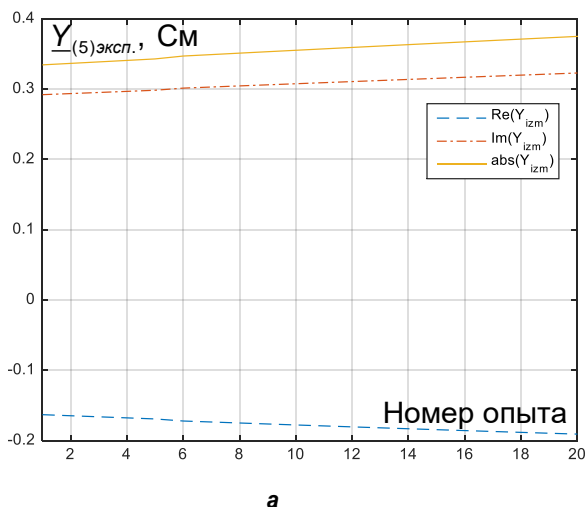


Рис. 5. Результаты определения активных, реактивных составляющих и модулей проводимости (а) и тока искажения (б) искажающей нагрузки Н1 для 5-й гармонической составляющей в результате серии из 20 опытов поочередного изменения мощности внешней нагрузки Н2 с постоянным коэффициентом мощности (пунктирные линии – активная составляющая, штрихпунктирные линии – реактивная составляющая, сплошные линии – модуль величины)

Fig. 5. Results of determining active, reactive components and absolute values of conductivity (a) and distortion current (b) of the distorting load Н1 for the 5th harmonic component as a result of a series of 20 experiments on alternating changes in the power of the external load Н2 with the constant power factor: dashed lines – active component, dash-dot lines – reactive component, solid lines – absolute values

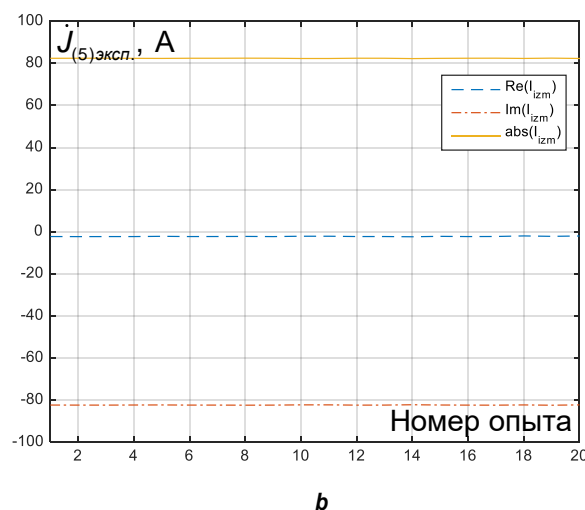
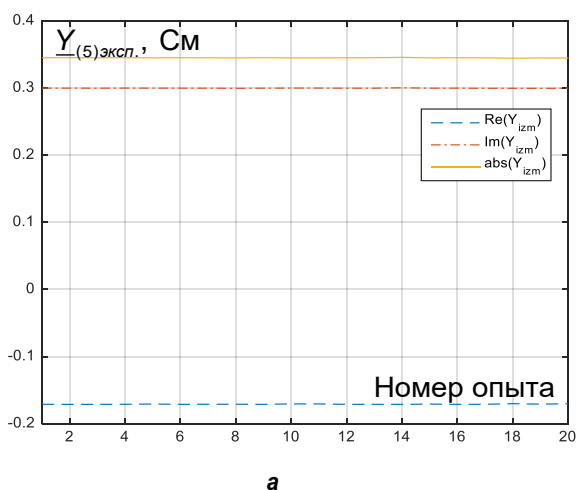


Рис. 6. Результаты определения активных, реактивных составляющих и модулей проводимости (а) и тока искажения (б) искажающей нагрузки Н1 для 5-й гармонической составляющей в результате серии из 20 опытов поочередного изменения реактивной мощности внешней нагрузки Н2 на случайную величину с математическим ожиданием 0 МВ·Ар и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0,1S_{H2}/3$ (пунктирные линии – активная составляющая, штрихпунктирные линии – реактивная составляющая, сплошные линии – модуль величины)

Fig. 6. Results of determining the active, reactive components and absolute values of conductivity (a) and distortion current (b) of the distorting load Н1 for the 5th harmonic component as a result of a series of 20 experiments on alternating changes in the reactive power of the external load Н2 by a random value with the expected value of 0 MV·Ar and a standard deviation $\sigma = 0.1S_{H2}/3$: dashed lines – active component, dash-dot lines – reactive component, solid lines – absolute values

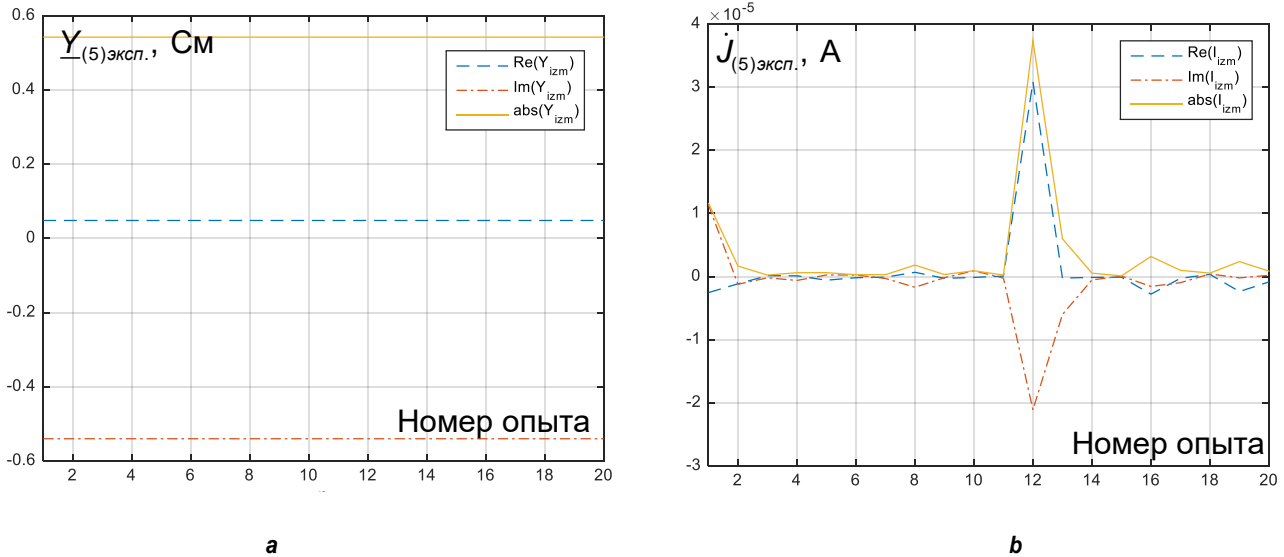


Рис. 7. Результаты определения активных, реактивных составляющих и модулей проводимости (а) и тока искажения (б) неискажающей внешней сети (энергосистема С и нагрузка Н2) для 5-й гармонической составляющей в результате серии из 20 опытов поочередного изменения активной мощности нагрузки Н1 на случайную величину с математическим ожиданием 0 МВт и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0,1P_{H1}/3$ (пунктирные линии – активная составляющая, штрихпунктирные линии – реактивная составляющая, сплошные линии – модуль величины)

Fig. 7. Results of determining the active, reactive components and absolute values of conductivity (a) and distortion current (b) of non-distorting external network (power system C and load H2) for the 5th harmonic component as a result of a series of 20 experiments on alternating changes in the active power of the load H1 by a random value with the expected value of 0 MW and standard deviation $\sigma = 0.1P_{H1}/3$: dashed lines – active component, dash-dot lines – reactive component, solid lines – absolute values

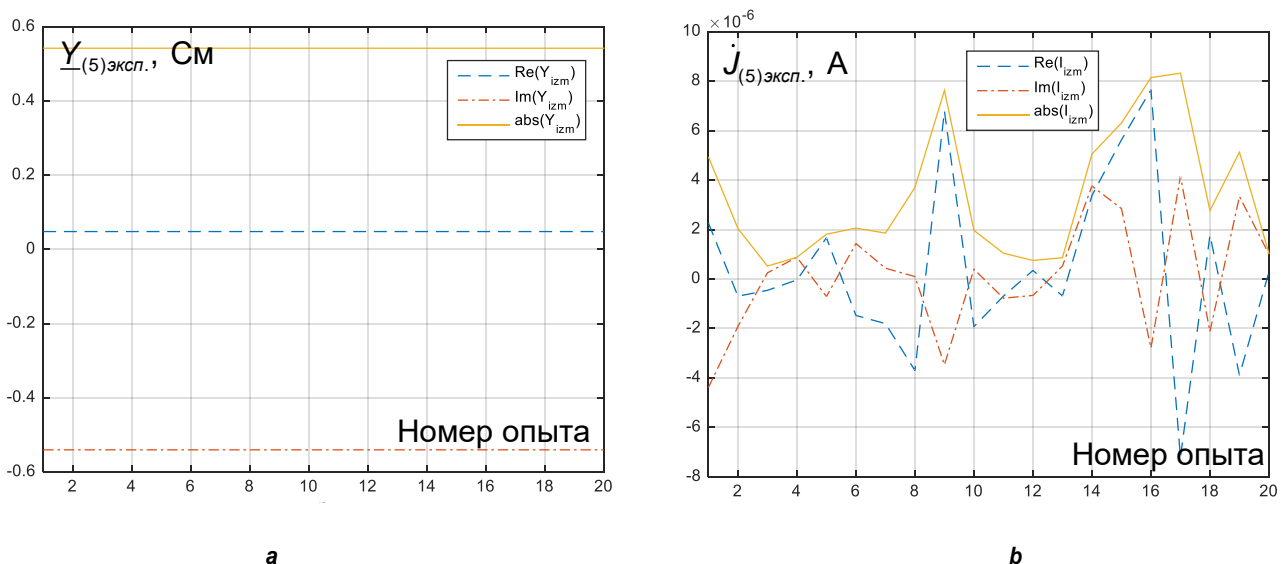


Рис. 8. Результаты определения активных, реактивных составляющих и модулей проводимости (а) и тока искажения (б) неискажающей внешней сети (энергосистема С и нагрузка Н2) для 5-й гармонической составляющей в результате серии из 20 опытов поочередного изменения реактивной мощности нагрузки Н1 на случайную величину с математическим ожиданием 0 МВ·Ар и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0,1Q_{H1}/3$ (пунктирные линии – активная составляющая, штрихпунктирные линии – реактивная составляющая, сплошные линии – модуль величины)

Fig. 8. Results of determining the active, reactive components and absolute values of conductivity (a) and distortion current (b) of the non-distorting external network (power system C and load H2) for the 5th harmonic component as a result of a series of 20 experiments on alternating changes in the reactive power of the load H1 by a random value with the expected value of 0 MV·Ar and standard deviation $\sigma = 0.1Q_{H1}/3$: dashed lines – active component, dash-dot lines – reactive component, solid lines – absolute values

источников искажения для 5-й гармонической составляющей. Для определения параметров выполнялось изменение мощности нагрузки Н1, что, согласно выражениям (5) и (6), позволит рассчитать параметры обобщенной внешней энергосистемы.

Выполнена серия экспериментов по изменению величины активной мощности нагрузки Н1 от величины 5 МВт на случайную величину с математическим ожиданием 0 МВт и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0,1 \cdot P_{H1} / 3$, при этом в любом опыте у нагрузки Н1 реактивная мощность (приведенная к частоте 50 Гц) составляла $Q_{LH1} = 2 \text{ МВ} \cdot \text{Ар}$. Результаты представлены на рис. 7.

Такая же серия экспериментов проведена с изменением только реактивной мощности у нагрузки Н1 Q_{LH1} на случайную величину с математическим ожиданием 0 МВ·Ар и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0,1 \cdot Q_{H1} / 3$, при этом активная мощность нагрузки Н1 $P_{H1} = 5 \text{ МВт}$ оставалась неизменной. Итоги эксперимента приведены на рис. 8.

На рис. 7, 8 получены стабильные значения проводимости внешней энергосистемы, при этом значения токов искажения эквивалентной энергосистемы близки к нулю, что соответствует параметрам проверяемой модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен анализ результатов метода двух измерений тока и напряжения, применяемого при экспериментальном определении параметров схемы замещения нагрузок на рассматриваемой n -й гармонической составляющей.

При проведении серии опытов на математической модели в MATLAB Simulink установлено, что диапазон изменения параметров нагрузки внешней сети существенно влияет на получаемые по методу двух измерений параметры схемы замещения на n -й гармонической составляющей. При этом обще-

принятым фактом считалось, что параметры схемы замещения не изменявшейся нагрузки должны оставаться постоянными. Лишь при относительно малых изменениях параметров режима (в пределах 10% от исходного значения) могут быть получены достоверные параметры схемы замещения.

Вероятной причиной зависимости получаемых по методу двух измерений параметров схемы замещения от диапазона изменения параметров режима является связь режима n -й гармонической составляющей с режимом на основной частоте, параметры которого при включении и отключении мощной нагрузки (в особенности реактивной) также будут существенно изменяться. В связи с этим можно рекомендовать использовать метод двух измерений для определения параметров схем замещения только при малых изменениях параметров режима, чтобы параметры изменяющейся внешней нагрузки не оказывали влияния на результат.

Также подтверждено, что у неискажающей нагрузки на рассматриваемой n -й гармонической составляющей ток искажения в эквивалентной схеме замещения действительно отсутствует, что хорошо согласуется с теоретическими данными. Однако у искажающей нагрузки (например, у рассмотренного в работе шестипульсного выпрямителя) присутствует ненулевая проводимость на рассматриваемой n -й гармонической составляющей. В настоящее время при проведении расчетов показателей качества электроэнергии данная проводимость не учитывается – для задания источников искажений используются только идеальные источники тока. Неучет проводимости искажающей нагрузки на n -й гармонической составляющей будет приводить к погрешностям при расчете показателей качества электроэнергии, поэтому требуется определять и учитывать данную проводимость при проведении расчетов и анализа показателей качества электроэнергии.

Список источников

1. Вагин Г. Я., Куликов А. Л. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля // Электриче-

ские станции. 2019. № 6. С. 54–59. <https://doi.org/10.34831/EP.2019.1055.44184>.

2. Коверникова Л. И., Серков А. В., Шамонов Р. Г. Об

управлении качеством электрической энергии в России в прошлом, настоящем и будущем // Энергетическая политика. 2018. № 1. С. 75–85.

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

4. Довгун В. П., Егоров Д. Э., Важенина И. Г., Синяговский А. Ф. Регулируемые фильтрокомпенсирующие устройства для систем тягового электроснабжения // Омский научный вестник. 2018. № 5. С. 45–50. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-161-45-50>.

5. Liu Baojin, Liu Zeng, Liu Jinjun, An Ronghui, Zheng Haoyang, Shi Yidong. An adaptive virtual impedance control scheme based on small-AC-signal injection for unbalanced and harmonic power sharing in islanded microgrids // IEEE Transactions on Power Electronics. 2019. Vol. 34. Iss. 12. P. 12333–12355. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2905588>.

6. Висящев А. Н., Федосов Д. С., Федчишин В. В. Оценка влияния электроприемников на уровень гармонических составляющих напряжения в электрической сети // Управление качеством электрической энергии: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 26–28 ноября 2014 г.). М.: Центр полиграфических услуг «Радуга», 2014. С. 209–216.

7. Serfontein D., Rens J., Botha G. Harmonic impedance assessment using prevailing phasors // 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378872>.

8. Дворкин Д. В., Силаев М. А., Тульский В. Н., Палис Ш. Проблемы оценки вклада потребителя в искажение качества электроэнергии // Электричество. 2017. № 7. С. 12–19. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2017-7-12-19>.

9. Пат. № 2244313, Российская Федерация, G01R 21/00. Способ определения потребителя, искажающего показатели качества электрической энергии в узле энергоснабжающей организации, и его вклада в искажение / О. И. Баглейбтер, А. Н. Висящев, И. И. Луцкий, С. Г. Тигунцев; заявители и патентообладатели А. Н. Висящев, С. Г. Тигунцев. Заявл. 27.06.2000; опубл. 10.01.2005. Бюл. № 1.

10. Zhao Xi, Yang Honggeng. A new method to calculate the utility harmonic impedance based on FastICA // IEEE Transactions on Power Delivery. 2016. Vol. 31. Iss. 1. P. 381–388. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2491644>.

11. Висящев А. Н., Федосов Д. С. Оценка влияния потребителей на искажение напряжения в электрической сети // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 3. С. 46–51.

12. Стариков А. В., Лисин С. Л., Беляева О. С., Кирдяшев В. А. Способ уменьшения амплитуд высших

гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2021. Т. 29. № 1. С. 120–132. <https://doi.org/10.14498/tech.2021.1.9>.

13. Носов Г. В., Кулешова Е. О. Расширенный метод эквивалентного генератора при синусоидальных токах // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 4. С. 75–78.

14. Ravindran V., Nakhodchi N., Rönnerberg S., Bollen M. H. J. Assessing time-varying harmonic interactions in a wind park // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 68151–68160. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3076879>.

15. Булатов Ю. Н., Крюков А. В., Суслов К. В. Исследование работы прогностических регуляторов устойчивости распределенной генерации в системе электроснабжения с мощным накопителем электроэнергии // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 14. № 4. С. 448–458. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0325>.

16. Bajaj M., Singh A. K., Alowaidi M., Sharma N. K., Sharma S. K., Mishra S. Power quality assessment of distorted distribution networks incorporating renewable distributed generation systems based on the analytic hierarchy process // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 145713–145737. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014288>.

17. Merlin M. M. C., Soto-Sanchez D., Judge P. D., Chaffey G., Clemow P., Green T. C., et al. The extended overlap alternate arm converter: a voltage-source converter with DC fault ride-through capability and a compact design // IEEE Transactions on Power Electronics. 2018. Vol. 33. Iss. 5. P. 3898–3910. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2723948>.

18. Федотов А. И., Федотов Е. А., Чернова Н. В. Схемы замещения вентильных преобразователей для расчета гармоник тока и напряжения. Ч. II // Электричество. 2007. № 11. С. 38–45.

19. Zare F., Soltani H., Kumar D., Davari P., Delpino H. A. M., Blaabjerg F. Harmonic emissions of three-phase diode rectifiers in distribution networks // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 2819–2833. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2669578>.

20. Joudah I. N., Abbas N. Asymptotically unbiased estimation of mean and standard deviation in the presence of outlying errors // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 110623–110632. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002958>.

21. Федосов Д. С. Методы уменьшения погрешностей экспериментального определения параметров схем замещения потребителей на высших гармониках // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 10. С. 254–261.

References

1. Vagin G. Ya., Kulikov A. L. Power quality in power supply systems. Analysis of the state of standardization and control methods. *Elektricheskie stantsii = Power Technology and Engineering*. 2019;6:54-59. (In Russ.). <https://doi.org/10.34831/EP.2019.1055.44184>.
2. Kovernikova L. I., Serkov A. V., Shamonov R. G. On electric power quality management in Russia in the past, present and future. *Energeticheskaya politika = Energy policy*. 2018;1:75-85. (In Russ.).
3. Zhang Xiao-Ping, Yan Zuanhong. Energy

- quality: a definition. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*. 2020;7:430-440. <https://doi.org/10.1109/OAJPE.2020.3029767>.
4. Dovgun V. P., Egorov D. E., Vazhenina I. G., Sinyagovsky A. F. Adjustable filter compensating devices for traction power supply systems. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2018;5:45-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-161-45-50>.
5. Liu Baojin, Liu Zeng, Liu Jinjun, An Ronghui, Zheng Haoyang, Shi Yidong. An adaptive virtual impedance control scheme based on small-AC-signal injection for unbalanced and harmonic power sharing in islanded microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019;34(12):12333-12355. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2905588>.
6. Visyashchev A. N., Fedosov D. S., Fedchishin V. V. Assessment of electrical receiver effect on the level of voltage harmonic components in the electrical network. *Upravlenie kachestvom elektricheskoy energii: sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = International Conference on Power Quality Management*. 26–28 November 2014, Moscow. M.: Raduga; 2014, p. 209-216. (In Russ.).
7. Serfontein D., Rens J., Botha G. Harmonic impedance assessment using prevailing phasors. In: *18th International Conference on Harmonics and Quality of Power*. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378872>.
8. Dvorkin D. V., Silayev M. A., Tul'skii V. N., Palis S. Problems of the estimation of the consumer's contribution to the power quality distortion in the point of common coupling. *Elektrichestvo*. 2017;7:12-19. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2017-7-12-19>.
9. Bagleibter O. I., Visyashchev A. N., Lutskiy I. I., Tigaretsev S. G. *Method for determining the consumer distorting electric energy quality indicators in the node of an energy supply organization, and consumer's contribution to the distortion*. Patent RF, no. 2244313; 2005. (In Russ.).
10. Zhao Xi, Yang Honggeng. A new method to calculate the utility harmonic impedance based on FastICA. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2016;31(1):381-388. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2491644>.
11. Visyashchev A. N., Fedosov D. S. Estimation of consumer impact on voltage distortion in electric network. *Ehlektrouhnergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric Power. Transmission and distribution*. 2018;3:46-51. (In Russ.).
12. Starikov A. V., Lisin S. L., Belyaeva O. S., Kirdyashev V. A. Method for reducing the amplitudes of higher harmonics in the output voltage of the frequency converter. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2021;29(1):120-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.14498/tech.2021.1.9>.
13. Nosov G. V., Kuleshova E. O. Extended method of equivalent generator under sinusoidal currents. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2011;319(4):75-78. (In Russ.).
14. Ravindran V., Nakhodchi N., Rönnerberg S., Bollen M. H. J. Assessing time-varying harmonic interactions in a wind park. *IEEE Access*. 2021;9:68151-68160. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3076879>.
15. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Suslov K. V. Research of operation of predictive controllers of distributed generation plant in power supply system with energy storage. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Series: Engineering & Technologies*. 2021;14(4):448-458. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0325>.
16. Bajaj M., Singh A. K., Alowaidi M., Sharma N. K., Sharma S. K., Mishra S. Power quality assessment of distorted distribution networks incorporating renewable distributed generation systems based on the analytic hierarchy process. *IEEE Access*. 2020;8:145713-145737. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014288>.
17. Merlin M. M. C., Soto-Sanchez D., Judge P. D., Chaffey G., Clemow P., Green T. C., et al. The extended overlap alternate arm converter: a voltage-source converter with DC fault ride-through capability and a compact design. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018;335:3898-3910. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2723948>.
18. Fedotov A. I., Fedotov E. A., Chernova N. V. Equivalent circuits of valve converters for calculating current and voltage harmonics. Part 2. *Ehlektrichestvo*. 2007;11:38-45. (In Russ.).
19. Zare F., Soltani H., Kumar D., Davari P., Delpino H. A. M., Blaabjerg F. Harmonic emissions of three-phase diode rectifiers in distribution networks. *IEEE Access*. 2017;5:2819-2833. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2669578>.
20. Joudah I. N., Abbas N. Asymptotically unbiased estimation of mean and standard deviation in the presence of outlying errors. *IEEE Access*. 2020;8:110623-110632. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002958>.
21. Fedosov D. S. Error minimization methods of experimental determination of power consumer equivalent circuit parameters for higher harmonics. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;10:254-261. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анненков Евгений Олегович,
учебный мастер кафедры электрических станций,
сетей и систем,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy O. Annenkov,
Training Master of the Department of Electric Stations,
Networks and Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Зубова Екатерина Васильевна,
аспирант,
специалист по учебно-методической работе
кафедры электрических станций, сетей и систем,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Селезнев Алексей Спартакович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры электрических станций, сетей
и систем,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Федосов Денис Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электрических станций, сетей
и систем,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Вклад авторов

Анненков Е. О. разработал математическую модель точки общего присоединения в MATLAB Simulink, провел необходимые расчеты. Зубова Е. В. выполнила обработку результатов, подготовила первую редакцию статьи. Селезнев А. С. участвовал в анализе результатов моделирования, формулировании выводов по работе. Федосов Д. С. сформулировал цель и задачи работы, участвовал в разработке и проверке корректности модели в MATLAB Simulink, в обработке результатов расчетных экспериментов, сформулировал выводы по работе.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 14.03.2022; одобрена после рецензирования 08.08.2022; принята к публикации 19.09.2022.

Ekaterina V. Zubova,
Postgraduate Student,
Teaching and Learning Specialist
of the Department of Electric Stations, Networks and
Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Aleksey S. Seleznev,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Electric
Stations, Networks and Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Denis S. Fedosov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Electric Stations, Networks
and Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Contribution of the authors

Annenkov E. O. developed the mathematical model of the point of common coupling in MATLAB Simulink, performed necessary calculations. Zubova E.V. processed the results, prepared the first edition of the article. Seleznev A.S. participated in the analysis of simulation results and conclusion formulation. Fedosov D.S. formulated the purpose and objectives of the work, participated in the development and verification of the model in MATLAB Simulink as well as in the processing of the results of computational experiments, formulated conclusions of the work.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 14.03.2022; approved after reviewing 08.08.2022; accepted for publication 19.09.2022.



Научная статья
УДК 621.22-226
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-415-425>

Применение адаптивного регулятора скорости вращения гидрогенератора с учетом технологического состояния турбины Каплана

Андрей Александрович Ачитаев^{1✉}, Анастасия Ивановна Валецкая²,
Михаил Фёдорович Носков³, Василий Иванович Татарников⁴

¹⁻⁴Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета, г. Саяногорск, рп. Черёмушки, Россия

¹aachitaev@shf-sfu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3225-2558>

²polezhaeva.nastya2011@yandex.ru

³egg1@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4514-7925>

⁴tvi_ger@inbox.ru

Резюме. Цель – оценка влияния протечек масла в турбине на основные параметры энергосистемы. Объектом исследования послужили реактивные гидравлические турбины с поворотными лопастными рабочими колесами (турбины Каплана), установленные на гидроэлектростанциях Майнская, Нижне-Бурейская, Вилюйская. Основные теоретические соотношения и выводы получены методами математического моделирования и интегрального исчисления с использованием программного комплекса MATLAB. В данной работе предложен способ контроля над протечками в корпусе поворотного рабочего колеса, внедрение которого сглаживает колебания изменений различных параметров (амплитуда, скорость вращения, фазовый угол, активная мощность, ток генератора) энергосистемы в случае протечек масла. Данный контроль предлагается сделать с помощью датчика, установленного в рабочем колесе, оптоволоконного кабеля и оптико-электрического преобразователя, расположенных от лопастей рабочего колеса вверх по валу и выведенных в маслоприемник соответствующего гидроагрегата. Проведенный анализ составленной математической модели (построены амплитудно-частотные и амплитудно-фазовые характеристики) относительно основных параметров вырабатываемой гидроагрегатом электрической энергии показал, что предложенный способ контроля протечек масла способствует повышению устойчивости работы гидроагрегата. При разработке модели были учтены следующие параметры гидроагрегата: угол поворота лопастей рабочего колеса и угол открытия направляющего аппарата гидротурбины. Разработанная блок-схема позволяет провести сравнение изменения параметров без контроля над протечками масла и с учетом автоматизированной системы контроля, предложенной авторами. Показано, что с помощью логарифмической амплитудно-фазовой характеристики, полученной в результате применения математической модели, можно проследить изменение и сглаживание амплитуды в нормальных условиях и с учетом наличия расхода масла в корпусе гидротурбины.

Ключевые слова: гидротурбина, синхронизация электрической сети, механическая мощность, параметры энергосистемы

Финансирование: Исследование проводилось в рамках гранта Президента Российской Федерации по проекту МК-3371.2022.4.

Для цитирования: Ачитаев А. А., Валецкая А. И., Носков М. Ф., Татарников В. И. Применение адаптивного регулятора скорости вращения гидрогенератора с учетом технологического состояния турбины Каплана // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 415–425. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-415-425>.

Original article

Application of an adaptive controller for controlling the rotational velocity of hydrogenerators taking into account the technological state of a Kaplan turbine

Andrey A. Achitaev^{1✉}, Anastasia I. Valetskaya²,
Mikhail F. Noskov³, Vasily I. Tatarnikov⁴

¹⁻⁴Siberian Federal University, Sayano-Shushensky branch, Cheremushki settlement, Russia

¹aaachitaev@shf-sfu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3225-2558>

²polezhaeva.nastya2011@yandex.ru

³egg@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4514-7925>

⁴tvi_ger@inbox.ru

Abstract. The impact of oil leakages in a turbine on the main power system parameters is investigated in reactive hydraulic turbines with adjustable-blade runners (Kaplan turbines) installed at Maynskaya, Nizhne-Bureiskaya and Vil-yuyskaya hydroelectric power plants. The main theoretical relations and conclusions were obtained by the methods of mathematical simulation and integral calculations in the MATLAB software environment. A method is proposed for monitoring leakages in the housing of an adjustable-blade runner and smoothing the fluctuations of various parameters (amplitude, rotational velocity, phase angle, active power and generator current) of the power system in the case of oil leakages. The control is performed by means of a sensor installed in the runner, a fiber-optic cable and an optical-electrical converter located along the shaft from the runner blades to the oil receiver of the corresponding hydraulic unit. The performed analysis of the obtained mathematical model (frequency response and Nyquist plots were built) relative to the basic parameters of the electrical energy generated by a hydraulic unit showed that the proposed method of monitoring oil leakages contributes to an increase in the operational stability of a hydraulic unit. When constructing the model, the following parameters of the hydraulic unit were taken into account: rotational angle of runner blades and opening angle of hydraulic turbine guide vanes. The developed block diagram can be used to compare variations in the parameters both without oil leakage control and taking into account the automated control system proposed by the authors. It is shown that the obtained logarithmic Nyquist plot can be used to monitor variations in the amplitude, as well as its smoothing, both under normal conditions and taking into account oil leakages in the hydraulic turbine housing.

Keywords: hydraulic turbine, power grid synchronization, mechanical power, power system parameters

Funding: The study was carried out within the framework of the grant of the President of the Russian Federation under the project MK-3371.2022.4.

For citation: Achitaev A. A., Noskov M. F., Valetskaya A. I., Tatarnikov V. I. Application of an adaptive controller for controlling the rotational velocity of hydrogenerators taking into account the technological state of a Kaplan turbine. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):415-425. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-415-425>.

ВВЕДЕНИЕ

В ходе эксплуатации гидроагрегатов на гидроэлектростанциях основной задачей является обеспечение их надежной работы, решаемой путем профилактических мер контроля и испытаний гидроагрегатов для раннего выявления и устранения дефектов, развитие которых может привести к аварийным отключениям агрегатов. Однако применяемые в настоящее время методы и средства обнаружения дефектов, особенно в режиме реального времени, не имеют достаточной эффективности, так как в них не в полной мере используются современные возможности. Основным вопросом, осложняющим экс-

плуатацию, является возможность протечек масла из рабочего колеса в воду. Устранение возникающих в межремонтный период недопустимых протечек масла требует внепланового вывода агрегатов из эксплуатации для осушки проточной части турбин и проведения ремонтных работ [1–20]. Простои гидроагрегатов из-за неудовлетворительной герметизации узлов снижают технико-экономические показатели работы оборудования, и изменение этой ситуации возможно при условии создания более эффективных и надежных уплотнений, а также в результате глубокой модернизации эксплуатируемых уплотнительных устройств.

Автоматизацию системы контроля над протечками предлагается выполнить на основе оптоволоконного кабеля, по которому передается сигнал с оптического датчика, установленного в корпусе рабочего колеса, на оптико-электрический преобразователь, находящийся в маслоприемнике (рис. 1 а), после чего сигнал отображается на щите управления гидроагрегатом (рис. 1 б). Эта система позволит моментально определить даже незначительные протечки в корпусе поворотно-лопастного (ПЛ) рабочего колеса.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проблема загрязнения деталей генератора из-за потерь масла через уплотнения масляных ванн направляющих подшипников и упорного подшипника до сих пор не полностью решена заводами-изготовителями [5]. В

то же время следует отметить, что причина неудовлетворительной работы уплотнений и смазки деталей и узлов не всегда является результатом ошибок в расчетах конструктора. Как правило, причиной является совокупность дефектов, возникающих в результате несовершенства конструкции, низкого качества изготовления, сборки, технического обслуживания или несоблюдения проектных требований.

Типы и характеристики конструкций уплотнительных элементов. На заводах используют несколько типов уплотнительных элементов для герметизации крышек и отсеков масляных ванн подшипников:

– лабиринтные уплотнения, состоящие из набора металлических колец, а также сегментов из тканевого ламината или фторопласта, создают эффект уплотнения за счет

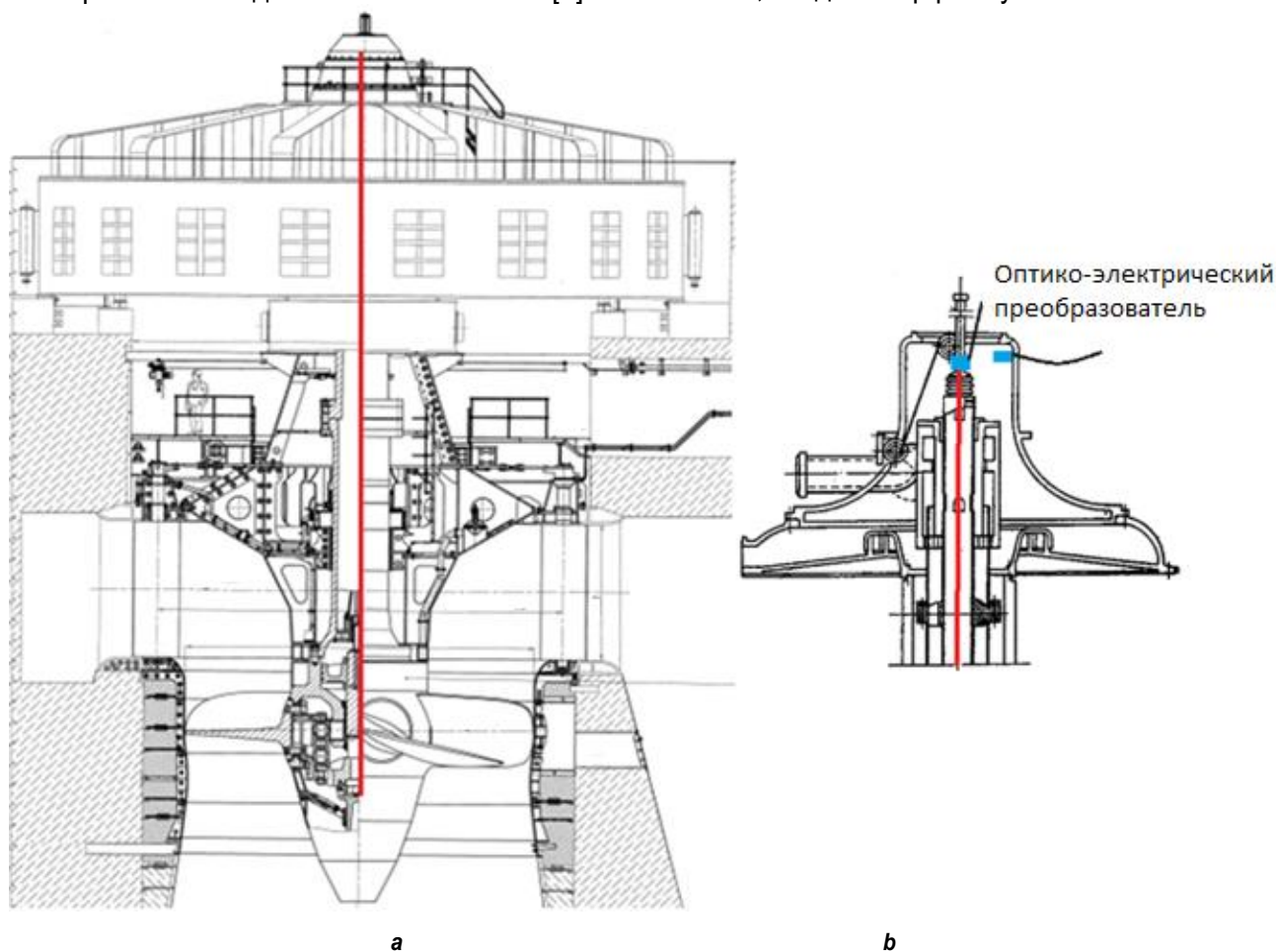


Рис. 1. Способ прокладки кабеля на разрезе гидроагрегата (а); установка оптико-электрического преобразователя в маслоприемнике (б)
Fig. 1. Method of cable laying in the section of the hydraulic unit (a); installation of an optical-electrical converter in the oil receiver (b)

создания турбулентности потока в камерах уплотнительной манжеты, имеющей переменные зазоры между валом и уплотнением по высоте. Такие уплотнения установлены заводом в подшипниках на агрегатах Плявиньской, Усть-Илимской, Вилуйской и других гидроэлектростанций. Уплотнения такого типа эффективны при высоких скоростях потока в зазоре и малых радиальных зазорах между валом и неподвижной манжетой;

– сальниковые уплотнения с рабочим элементом из войлока применяются довольно часто. Этот тип уплотнения может быть использован для защиты от пыли, но он не может предотвратить выход паров масла из ванны в случае значительного перепада давления. Однако по сравнению с лабиринтными уплотнениями эффективность сальников значительно выше.

Уплотнения этого типа при правильном расположении кольца и качественном монтаже полностью предотвращают выброс масла и выход паров из ванны в зону низкого давления. Уплотнительные кольца хорошо работают при малых и средних перепадах давления, но они требуют наличия смазки или применения специальных материалов. Характерной и частой ошибкой является неправильное размещение кольца, когда изгиб кольца направлен в сторону более низкого давления. В этом случае кольцо не препятствует выходу масла и паров. Верным является размещение кольца с изгибом в сторону более высокого давления. В этом случае происходит дополнительное уплотнение зазора за счет прижатия кольца к валу под действием более высокого давления из ванны.

В статье [5] описана проблема протечки, проведен анализ причин, по которым возникают данные явления. Представлены методы диагностики и решения, позволяющие уменьшить масляный след. Но, как показывают выводы исследования, в ходе эксплуатации поворотных лопастных гидротурбин необходимо учитывать расход масла по причине утечки. Поэтому в данной статье ставится задача учета утечки масла при реализации автоматической настройки параметров регулятора скорости турбины в зависимости от величины утечки. Но чтобы понять, как это

сделать, принимается метод, который описан в статье [2]. Также в ней рассматривается принцип коррекции управления с учетом внешних факторов, в том числе изменения давления в сервоприводе. Но существует ряд особенностей поворотных лопастных гидротурбин. Специализированный источник [1] описывает потери масла в нижней бьеф, которые регулируются техническими условиями на турбину. Для агрегатов средней мощности утечка на лопатку не должна превышать 0,15 л/сут. Обследование состояния уплотнений рабочих колес поворотных лопастных турбин на 21 гидроэлектростанции, которое проводилось в 90-х гг. прошлого столетия показало, что на 11 станциях утечки масла составили 5–10 т/год на одну гидротурбину, т.е. в десять раз и более превышающую норму. Для каскада Волжских гидроэлектростанций утечки масла только через уплотнения лопаток составляют около 500 т/год без учета разовых утечек через поврежденные уплотнения [1]. Работа ПЛ турбин при частичных нагрузках и переменных напорах сопровождается потерей выработки электроэнергии, сужением регулируемого диапазона и повышенными вибрациями в переходных режимах, на холостом ходу и при частичных нагрузках. Однако в некоторых случаях (Рыбинская, Кегумская, Бухтарминская гидроэлектростанции) перевод турбин ПЛ на пропеллерные, по расчетам специалистов гидроэлектростанций, экономически оправдан за счет снижения эксплуатационных расходов на осушение водовода и замену уплотнений, которые превышают потери от недостаточной выработки электроэнергии.

Содержание и эксплуатация старых сооружений, особенно постоянная замена уплотнений лопастей, требуют больших затрат. Однако ряд авторов утверждают о том, что в случае улучшения динамики закрытия или открытия лопаток ПЛ турбины позволяют минимизировать величину расхода масла.

Данная статья отражает вопрос повышения качества управления с учетом наличия утечки масла в системе регулирования поворота лопасти ПЛ турбины.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ

Для исследования переходных режимов при работе турбины рассмотрена электрическая сеть, изображенная на рис. 2. Рассматривается управление поворотными лопастными турбинами. Современное развитие средств управления гидравлических турбин развивается с использованием различных способов воздействия. В мировых специализированных литературных источниках можно выделить три основных типа контроллеров скорости [3].

В пересчете на единицу измерения это соотношение выглядит следующим образом:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{[1 - h - h_i]}{T_w},$$

где h и h_i – напор на турбине и потери напора, м, соответственно, при этом h_{base} определяется как статический напор воды на турбину, м; T_w – постоянная времени воды или времени начала движения воды, определяется как

$$T_w = \left(\frac{L}{A}\right) \frac{q_{base}}{h_{base}g} \text{secs},$$

где q_{base} выбирается как расход турбины при полностью открытых затворах (положение затвора $G = 1$), м³/с, и напоре на турбине равном h_{base} .

Таким образом, удельная мощность турбины P_m выражается как

$$P_m = A_t h(q - q_{ni}) - DG\Delta\omega,$$

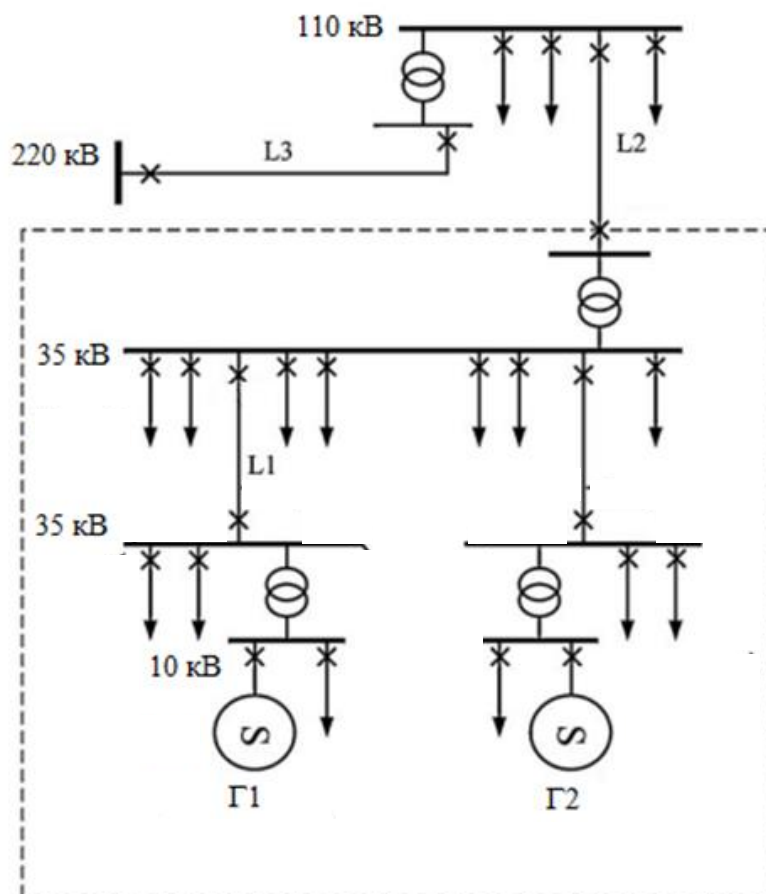


Рис. 2. Пример различных зон (областей) изолированного отключения, которые формируются при размыкании смежных автоматических выключателей

Fig. 2. Example of different zones (areas) of isolated tripping that are formed when adjacent automatic circuit breakers are open

где q_{ni} – удельный расход турбины на холостом ходу, учитывающий установленную мощность турбин, м³/с; A_t – коэффициент пропорциональности, который принимается постоянным. Он рассчитывается с использованием номинальной мощности турбины и мощности генератора в МВ·А.

Изменение механической мощности может быть выражено как

$$\Delta P_m = \frac{A_t(1-T_1s)\Delta G}{(1+T_2s)} - DG_0\Delta\omega,$$

где G_0 – угол поворота лопастей в рабочей точке, град.

$$T_1 = (a_0 - a_{ni})T_w;$$

$$T_2 = G_0 \frac{T_w}{2},$$

где a_0 – открытие лопаток в рабочей точке.

Гидротурбины, из-за их первоначальной обратной характеристики мощности на изменение угла поворота лопастей, требуют обеспечения функции снижения скорости регулятором скорости для стабильной работы управления [17, 19]. При быстрых отклонениях частоты регулятор демонстрирует высокое регулирование (низкий коэффициент усиления), в то время как при медленных изменениях и в устойчивом состоянии регулятор демонстрирует обычное низкое регулирование (высокий коэффициент усиления) [6–9].

С точки зрения анализа линейного управления случай гидрогенератора, питающего изолированную нагрузку, может быть представлен блок-схемой на рис. 3, включающей ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференцирующий).

С помощью логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) (рис. 4) можно проследить изменение и сглаживание амплитуды в нормальных условиях и с учетом наличия расхода масла в корпусе гидротурбины, а также область допустимой работы ГА (гидроагрегата).

Математические модели, используемые

для расчетов переходных процессов, должны учитывать все наиболее существенные факторы, имеющие место в натуре. Динамика процессов при сбросах нагрузки агрегатов с осевыми турбинами характеризуется высокой интенсивностью изменения вращающего момента турбины, связанного с гидравлическим ударом и крутильными колебаниями агрегата, который является двухмассовой системой, связанной упругим валом [10–15]. Параметры крутильных колебаний зависят не только от показателей инерции ротора и рабочего колеса, но и от участвующей в колебаниях массы воды. Характеристики крутильных колебаний используются при прочностных расчетах вала, определяют пульсационную составляющую давления в водоводах, влияют на показатели качества регулирования частоты и мощности. Соответственно, при учете всех вышеперечисленных параметров скорость вращения гидротурбины после пуска установится на номинальное значение с меньшими колебаниями, что видно из рис. 5.

Обычный анализ частотной характеристики и графика ЛАЧХ этой системы управления показывает, что чисто пропорциональный регулятор должен быть настроен с очень низким коэффициентом усиления для приемлемой стабильности, что дает очень низкое (или высокое) регулирование. Это видно из рис. 6, показывающего асимптотические графики коэффициента усиления и фазового угла в разомкнутом контуре, а также из рис. 7, показывающего реакцию на ступенчатое изменение электрической нагрузки для различных значений коэффициента пропорционального усиления K . Этот пример с использованием времени запуска воды T_w , 2 с и постоянной инерции H 4 с показывает, что для приемлемой стабильности коэффициент пропорционального регулирования должен быть ограничен примерно 3 на единицу, что означает неприемлемо высокое регулирование 33%. Зависимость продольной составляющей тока генератора также представлена на рис. 8.

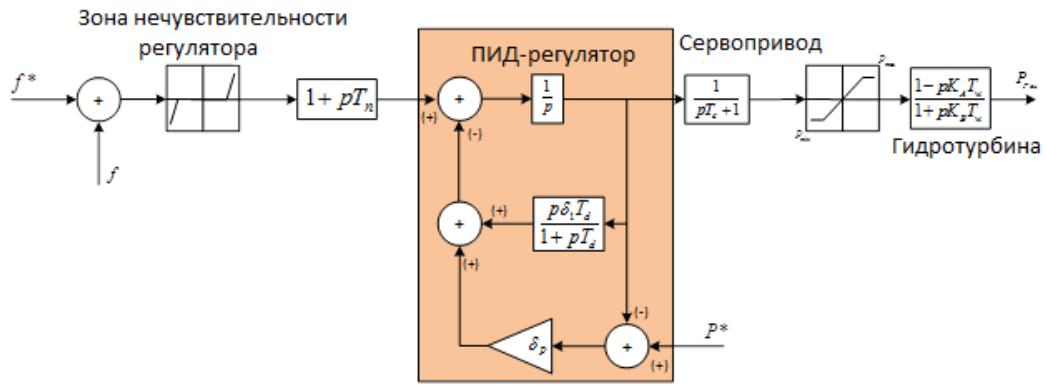


Рис. 3. Регулятор скорости и активной мощности (K – коэффициенты ПИД-регулятора, p – пропорциональная составляющая, δ – дифференциальная составляющая, T – постоянная времени): a – стандартный [4]; b – адаптивный
Fig. 3. Speed and active power controller (K – PID (proportional integral derivative controller) coefficients, p – proportional component, δ – derivative component, T – time constant): a – standard [4]; b – adaptive

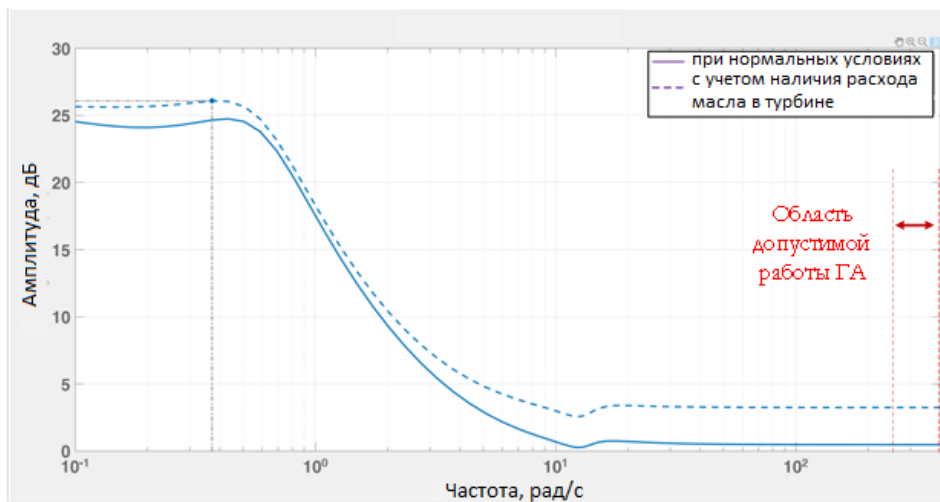


Рис. 4. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика
Fig. 4. Logarithmic amplitude frequency response

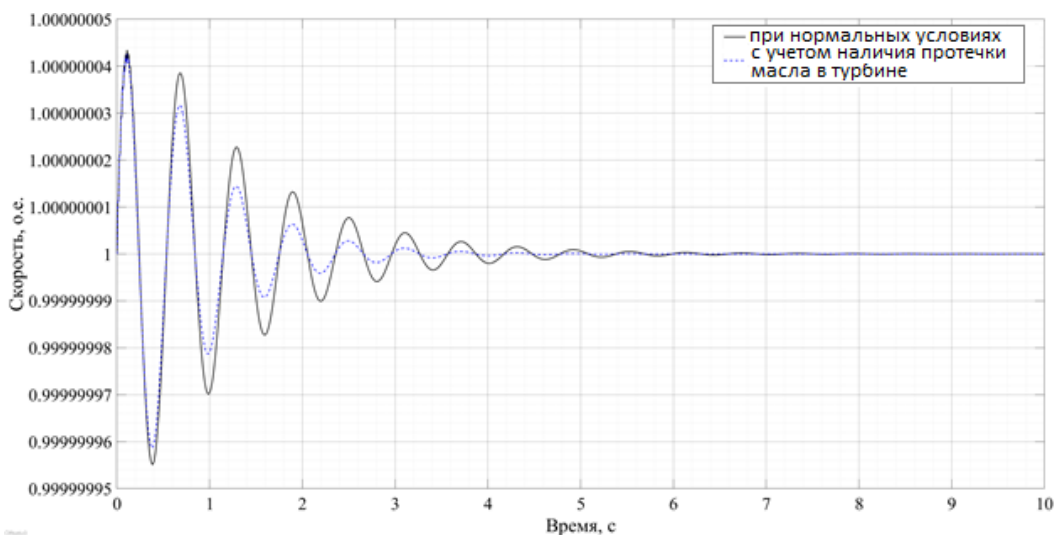


Рис. 5. Зависимость скорости вращения гидроагрегата от времени
Fig. 5. Dependence of the hydroelectric unit velocity on time

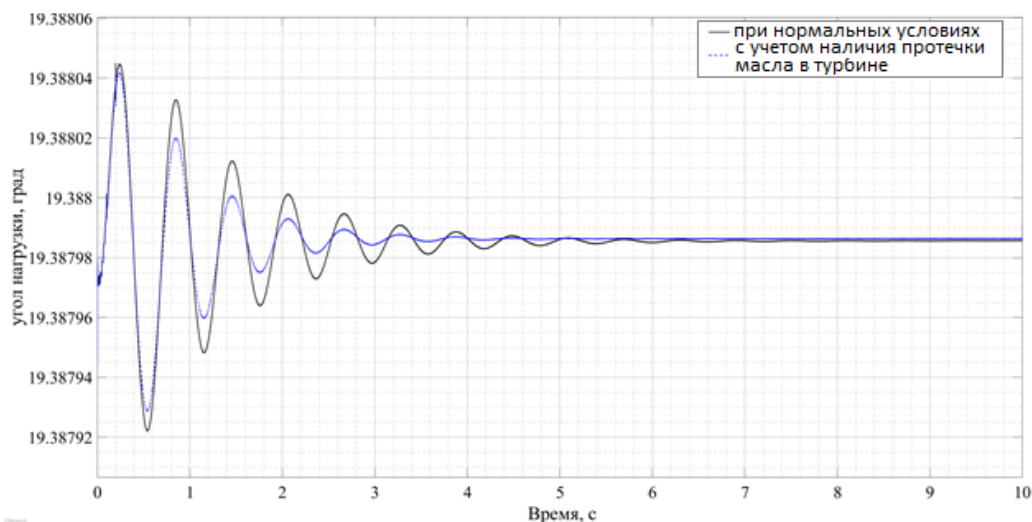


Рис. 6. Зависимость фазового угла в разомкнутом контуре от времени
Fig. 6. Dependence of the phase angle in the open loop on time

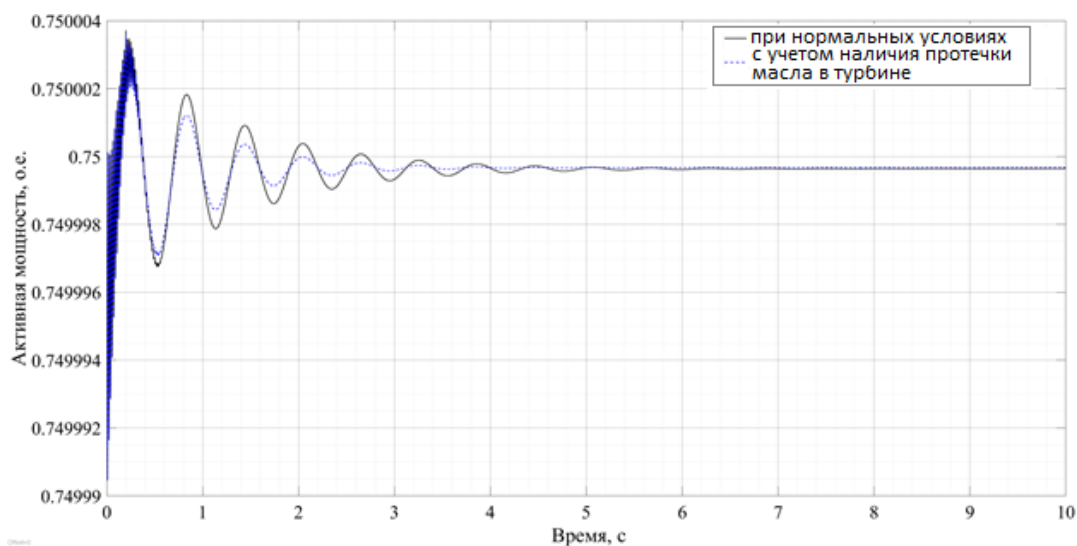


Рис. 7. Зависимость активной мощности от времени
Fig. 7. Dependence of the active power on time

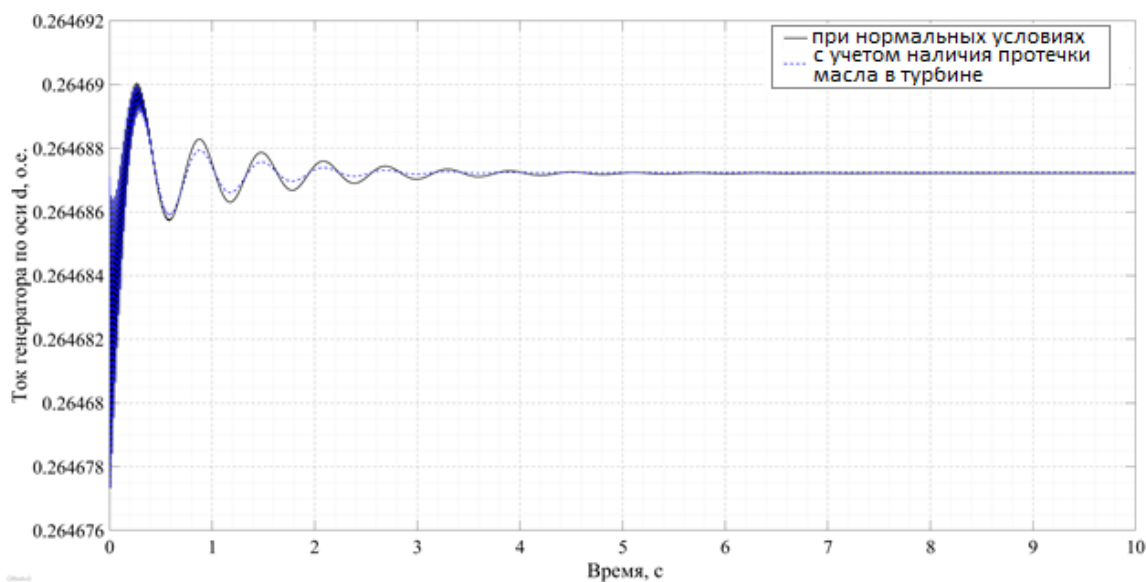


Рис. 8. Зависимость тока генератора I_d от времени
Fig. 8. Dependence of the generator current I_d on time

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в работе способ автоматизации контроля над протечками позволит:

– повысить качество электрических параметров, а также устойчивость работы гидроагрегата;

– уменьшить трудозатраты на обслуживание и ремонт механических уплотнений в

корпусе рабочего колеса.

Рассмотренная математическая модель позволила проанализировать влияние возникновения и изменения переходных процессов, что подтверждает ее корректность. Такой анализ позволил доказать значимый с точки зрения безопасности и улучшения качества выдаваемой электроэнергии эффект.

Список источников

1. Markin V. N., Tomilin V. I., Il'in A. Yu. Operation of units with adjustable-blade turbines converted to a propeller regime // *Hydrotechnical Construction*. 1988. Vol. 22. Iss. 7. P. 430–436. <https://doi.org/10.1007/BF01432355>.
2. Karabegovic A., Hinteregger M., Christoph J., Mohl W., Gföhler M. Closed-loop helium circulation system for actuation of a continuously operating heart catheter pump // *International Journal of Artificial Organs*. 2017. Vol. 40. Iss. 6. P. 272–281. <https://doi.org/10.5301/ijao.5000593>.
3. Mohamad H., Mokhlis H., Bakar A. H. A., Ping Hew Wooi. A review on islanding operation and control for distribution network connected with small hydro power plant // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15. Iss. 8. P. 3952–3962. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.010>.
4. Mover W. G. P., Supply E. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies // *IEEE Transactions on Power Systems*. 1992. Vol. 7. Iss. 1. P. 167–179. <https://doi.org/10.1109/59.141700>.
5. Ustalov V. A., Ustalova T. P. Technical developments to prevent fouling of generator parts with oil // *Hydrotechnical Construction*. 1995. Vol. 29. Iss. 8. P. 438–442. <https://doi.org/10.1007/BF02446368>.
6. Xu Haoming, Wang Deyi, Liu Jiajun. Process control optimization for hydroelectric power based on neural network algorithm // *AMSE Journals-AMSE IETA*. 2017. Vol. 72. No. 2. P. 155–166. https://doi.org/10.18280/ama_c.720204.
7. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость / пер. с англ., под ред. Я. Н. Лугинского. М.: Изд-во «Энергия», 1980. 569 с.
8. Ding Tao, Lin Yanling, Bie Zhaohong, Chen Chen. A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration // *Applied Energy*. 2017. Vol. 199. P. 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.012>.
9. Heong Oon Kheng, Tan Chia Kwang, Bakar A. H. B. A., Che Hangseng. Establishment of fault current characteristics for solar photovoltaic generator considering low voltage ride through and reactive current injection requirement // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 92. P. 478–488. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.001>.
10. Ekonomou L., Vita V., Fotis G. P., Mladenov V. Distributed generation islanding effect on distribution networks and end user loads using the master-slave islanding method // *Journal of Power and Energy Engineering*. 2016. Vol. 4. Iss. 10. P. 1–24. <https://doi.org/10.4236/jpee.2016.410001>.
11. Maina D. K., Sanjari M. J., Nair N.-K. C. Voltage and Frequency Response of Small Hydro Power Plant in Grid Connected and Islanded Mode // *Australasian Universities Power Engineering Conference*. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2018.8757944>.
12. Mohamad H., Laghari J. A., Bakar A. H. A., Salim N. A., Yasin Z. M. A New centralized controller for islanding operation of distribution network connected with rotating type DG // *IEEE International Conference in Power Engineering Application*. <https://doi.org/10.1109/ICPEA51500.2021.9417754>.
13. Shafique N., Raza S., Bibi S., Farhan M., Riaz M. A simplified passive islanding detection technique based on susceptible power indice with zero NDZ // *Ain Shams Engineering Journal*. 2021. Vol. 13. Iss. 4. P. 101637. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.11.006>.
14. Borkute R., Malwar N. Control for Grid Connected and Intentional Islanding of Distributed Power Generation // *Trend in Scientific Research and Development*. 2019. Vol. 3. Iss. 4. P. 333–336. <https://doi.org/10.31142/ijtsrd23679>.
15. Wei Liangliang, Nakamura T., Imai K. Development and optimization of low-speed and high-efficiency permanent magnet generator for micro hydro-electrical generation system // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 147. Part 1. P. 1653–1662. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.049>.
16. Paiva S., Ribeiro R. L. A., Alves D., Costa F. B. A wavelet-based hybrid islanding detection system applied for distributed generators interconnected to AC microgrids // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 121. Iss. 4. P. 106032. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106032>.
17. Kumar A., Riyaz S., Mahanty R. N. A Comprehensive review of conventional and computational islanding diagnosis of distributed generator in distribution network // *Recent Advances in Power Systems / eds. O. H. Gupta, V. K. Sood*. Vol. 699. Singapore: Springer, 2021. P. 509–520. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7994-3_47.
18. Lima R. L., Vieira J. C. M. Performance indices for assessing the power quality of islanded operation of distributed generators // *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. 2021. Vol. 32. P. 747–755. <https://doi.org/10.1007/s40313-021-00698-w>.
19. Lim SungHoon, Choi Donghee, Lee Soo Hyung, Kang Chongqing, Park Jung-Wook. Frequency stability enhancement of low-inertia large-scale power system based on grey wolf optimization // *IEEE Power & Energy Society Section*. 2022. Vol. 10. Iss. 1-1. P. 11657–11668. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3146710>.
20. Gracino R., Hansen V., Goia L., Campos A.,

Campos B. System Identification of a Small Hydropower Plant // 14th IEEE International

Conference on Industry Applications. 2021. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON51756.2021.9529511>.

References

1. Markin V. N., Tomilin V. I., Il'in A. Yu. Operation of units with adjustable-blade turbines converted to a propeller regime. *Hydrotechnical Construction*. 1988;22(7):430-436. <https://doi.org/10.1007/BF01432355>.
2. Karabegovic A., Hinteregger M., Christoph J., Mohl W., Gföhler M. Closed-loop helium circulation system for actuation of a continuously operating heart catheter pump. *International Journal of Artificial Organs*. 2017;40(6):272-281. <https://doi.org/10.5301/ijao.5000593>.
3. Mohamad H., Mokhlis H., Bakar A. H. A., Ping Hew Wooi. A review on islanding operation and control for distribution network connected with small hydro power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15(8):3952-3962. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.010>.
4. Mover W. G. P., Supply E. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies. *IEEE Transactions on Power Systems*. 1992;7(1):167-179. <https://doi.org/10.1109/59.141700>.
5. Ustalov V. A., Ustalova T. P. Technical developments to prevent fouling of generator parts with oil. *Hydrotechnical Construction*. 1995;29(8):438-442. <https://doi.org/10.1007/BF02446368>.
6. Xu Haoming, Wang Deyi, Liu Jiajun. Process control optimization for hydroelectric power based on neural network algorithm. *AMSE Journals-AMSE IETA*. 2017;72(2):155-166. https://doi.org/10.18280/ama_c.720204.
7. Anderson P. M., Fouad A. Power system control and stability, 1980. 569 p. (Russ. ed.: *Upravlenie energosistemami i ustojchivost'*. Moscow, Energiya; 1980, 569 p.)
8. Ding Tao, Lin Yanling, Bie Zhaohong, Chen Chen. A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration. *Applied Energy*. 2017;199:205-216. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.012>.
9. Heong Oon Kheng, Tan Chia Kwang, Bakar A. H. B. A., Che Hangseng. Establishment of fault current characteristics for solar photovoltaic generator considering low voltage ride through and reactive current injection requirement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;92:478-488. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.001>.
10. Ekonomou L., Vita V., Fotis G. P., Mladenov V. Distributed generation islanding effect on distribution networks and end user loads using the master-slave islanding method. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2016;4(10):1-24. <https://doi.org/10.4236/jpee.2016.410001>.
11. Maina D. K., Sanjari M. J., Nair N.-K. C. Voltage and frequency response of small hydro power plant in grid connected and islanded mode. In: *Australasian Universities Power Engineering Conference*. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2018.8757944>.
12. Mohamad H., Laghari J. A., Bakar A. H. A., Salim N. A., Yasin Z. M. A New centralized controller for islanding operation of distribution network connected with rotating type DG. In: *IEEE International Conference in Power Engineering Application*. 10.1109/ICPEA51500.2021.9417754.
13. Shafique N., Raza S., Bibi S., Farhan M., Riaz M. A simplified passive islanding detection technique based on susceptible power indice with zero NDZ. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021;13(4):101637. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.11.006>.
14. Borkute R., Malwar N. Control for grid connected and intentional islanding of distributed power generation. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*. 2019;3(4):333-336. <https://doi.org/10.31142/ijtsrd23679>.
15. Wei Liangliang, Nakamura T., Imai K. Development and optimization of low-speed and high-efficiency permanent magnet generator for micro hydro-electrical generation system. *Renewable Energy*. 2020;147(1):1653-1662. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.049>.
16. Paiva S., Ribeiro R. L. A., Alves D., Costa F. B. A wavelet-based hybrid islanding detection system applied for distributed generators interconnected to AC microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020;121(4):106032. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106032>.
17. Kumar A., Riyaz S., Mahanty R. N. A comprehensive review of conventional and computational islanding diagnosis of distributed generator in distribution network. In: Gupta O. H., Sood V. K. (eds.). *Recent Advances in Power Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Vol. 699. Singapore: Springer, 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7994-3_47.
18. Lima R. L., Vieira J. C. M. Performance indices for assessing the power quality of islanded operation of distributed generators. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. 2021;32:747-755. <https://doi.org/10.1007/s40313-021-00698-w>.
19. Lim SungHoon, Choi Donghee, Lee Soo Hyoung, Kang Chongqing, Park Jung-Wook. Frequency stability enhancement of low-inertia large-scale power system based on grey wolf optimization. *IEEE Power & Energy Society Section*. 2022;10(1-1):11657-11668. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3146710>.
20. Gracino R., Hansen V., Goia L., Campos A., Campos B. System identification of a small hydropower plant. In: *14th IEEE International Conference on Industry Applications*. 2021. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON51756.2021.9529511>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ачитаев Андрей Александрович,
кандидат технических наук,
заведующий кафедрой гидроэнергетики,
гидроэлектростанций,
электроэнергетических систем и электрических сетей,
Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального
университета,
655619, г. Саяногорск, рп. Черёмушки, 46, Россия

Валецкая Анастасия Ивановна,
старший преподаватель кафедры гидроэнергетики,
гидроэлектростанций, электроэнергетических систем
и электрических сетей,
Саяно-Шушенский филиал Сибирского
федерального университета,
655619, г. Саяногорск, рп. Черёмушки, 46, Россия

Носков Михаил Фёдорович,
доктор технических наук,
профессор кафедры гидроэнергетики,
гидроэлектростанций, электроэнергетических систем
и электрических сетей,
Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального
университета,
655619, г. Саяногорск, рп. Черёмушки, 46, Россия

Татарников Василий Иванович,
доцент кафедры гидроэнергетики,
гидроэлектростанций,
электроэнергетических систем и электрических сетей,
Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального
университета,
655619, г. Саяногорск, рп. Черёмушки, 46, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 30.03.2022; одобрена после рецензирования 11.05.2022; принята к публикации 23.08.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey A. Achitaev,
Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Department of Hydropower, Hydroelectric
Power Plants,
Electric Power Systems and Electric Networks,
Sayano-Shushensky branch of the Siberian Federal
University,
46, Cheryomushki settlement, Sayanogorsk 655619,
Russia

Anastasia I. Valetskaya,
Senior Lecturer of the Department of Hydropower,
Hydroelectric Power Plants,
Electric Power Systems and Electric Networks,
Sayano-Shushensky branch of the Siberian Federal
University,
46, Cheryomushki settlement, Sayanogorsk 655619,
Russia

Mikhail F. Noskov,
Dr. Sc. (Eng.),
Professor of the Department of Hydropower,
Hydroelectric Power Plants,
Electric Power Systems and Electric Networks,
Sayano-Shushensky branch of the Siberian Federal
University,
46, Cheryomushki settlement, Sayanogorsk 655619,
Russia

Vasily I. Tatarnikov,
Associate Professor of the Department of Hydropower,
Hydroelectric Power Plants,
Electric Power Systems and Electric Networks,
Sayano-Shushensky branch of the Siberian Federal
University,
46, Cheryomushki settlement, Sayanogorsk 655619,
Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 30.03.2022; approved after reviewing 11.05.2022; accepted for publication 23.08.2022.



Научная статья

УДК 621.165

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-426-438>

Оценка модернизации схемы основного конденсата энергоблока № 5 ТЭЦ-10 с применением его настроенной математической модели

Федор Викторович Забуга^{1✉}, Виталий Эдуардович Алексеюк²^{1,2}Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия¹ООО «Инженерный центр «Иркутскэнерго», Иркутск, Россия¹xpbellow@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2298-3530>²alexeyuk.vitaliy@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4226-0519>

Резюме. Цель – исследование изменения технологической схемы основного конденсата на энергетическую и экономическую эффективность эксплуатации энергоблока №5 ТЭЦ-10 ООО «Байкальская энергетическая компания» с применением его настроенной математической модели. Математическое моделирование исследуемого энергоблока выполнялось в программно-вычислительном комплексе «Система машинного построения программ». Построенная математическая модель была верифицирована по результатам замеров контрольных параметров в нескольких режимах работы в соответствии с трехэтапной методикой идентификации математических моделей сложных теплоэнергетических установок. Авторами предложен оригинальный подход модернизации тепловой схемы основного конденсата энергоблока с целью снижения удельного расхода топлива на собственные нужды. Идея заключается во включении в схему основного конденсата дополнительного насоса уплотнений питательных электронасосов блока 1Кс-20-110, который позволит решить проблему неправильного выбора конденсатных насосов данного энергоблока. Показано, что перераспределение потока основного конденсата между конденсатными насосами энергоблока и предлагаемым насосом уплотнений 1Кс-20-110 приводит к снижению удельного расхода топлива на выработку электроэнергии на 0,32 г.у.т/кВт·ч в диапазоне электрических нагрузок от 137 до 150 МВт. В результате КПД нетто энергоблока увеличится на 0,03%. Также следует отметить, что данная модернизация позволит снизить расход электроэнергии на собственные нужды при нахождении питательного электронасоса в режиме аварийного резерва на остановленном энергоблоке. На основании выполненных энергетических и экономических расчетов было показано, что экономия электроэнергии по данным 2019 г. могла составить 82653 кВт·ч, а общая экономия средств за год оценивается в 78030 руб. Таким образом, проведенные исследования демонстрируют высокую эффективность применения аппарата математического моделирования при изучении и оптимизации действующих теплоэнергетических установок.

Ключевые слова: угольный энергоблок, собственные нужды, математическое моделирование, идентификация параметров, конденсатный электронасос, питательный электронасос

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0005) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

Для цитирования: Забуга Ф. В., Алексеюк В. Э. Оценка модернизации схемы основного конденсата энергоблока №5 ТЭЦ-10 с применением его настроенной математической модели // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 426–438. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-426-438>.

Evaluation of a modernization project of the main condensate scheme at CHP-10 power unit No. 5 using its customized simulation model

Fedor V. Zabuga^{1✉}, Vitaliy E. Alekseyuk²

^{1,2}Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

¹Engineering Center "Irkutskenergo" LLC, Irkutsk, Russia

¹xpbellow@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2298-3530>

²alekseyuk.vitaliy@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4226-0519>

Abstract. We investigate the effect of modernizing the main condensate scheme applied at the power unit No.5, CHP-10 of Baikal Energy Company LLC, on its energy and economic efficiency using a customized simulation model. Simulation modelling was carried out in the *Machine Program Building System* software environment. The constructed model was verified using the results of measuring control parameters in several operating modes according to a three-stage procedure of verifying the mathematical models of complex thermal power units. We propose an original approach to modernizing the main condensate thermal scheme at the power unit under study in order to reduce the specific fuel consumption for balance-of-plant needs. The idea was to expand the main condensate scheme by including an additional sealing pump to the feedwater electric pumps of the 1Ks-20-110 unit in order to avoid the incorrect selection of condensate pumps. The study showed that the redistribution of the main condensate flow between the existing condensate pumps and the proposed 1Ks-20-110 sealing pump leads to a reduction in the specific fuel consumption for the electric energy generation to 0.32 g of fuel per kWh across the range of electrical loads from 137 to 150 mW. As a result, the net efficiency of the power unit can be raised by 0.03%. It should be noted that the proposed modernization project may reduce the consumption of electricity for balance-of-plant needs when the feedwater electric pump is switched to the standby mode during an emergency shutdown of the power unit. Based on the performed energy and economic calculations, energy savings for the period of 2019 comprise 82,653 kWh, while the total annual savings are estimated at 78,030 rubles. Thus, the conducted research demonstrates the high efficiency of applying simulation modelling in the study and optimization of existing thermal power plants.

Keywords: coal-fired power unit, auxiliaries, mathematical modeling, parameter identification, condensate electric pump, feed electric pump

Acknowledgement: The work was carried out within the framework of the draft state task (no. FWEU -2021-0005) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation for the period from 2021 to 2030 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project no. 13. Multi-Access Research Center 21.0038).

For citation: Zabuga F. V., Alekseyuk V. E. Evaluation of a modernization project of the main condensate scheme at CHP-10 power unit No. 5 using its customized simulation model. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):426-438. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-426-438>.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных проблем современного энергетического производства на российских тепловых электростанциях (ТЭС) является снижение экономичности их работы из-за повышенного потребления энергии на собственные нужды электростанции. Собственные нужды электростанции (СН) – это комплекс вспомогательного электрического оборудования электростанции, который обеспечивает бесперебойную работу ее основных агрегатов: паровых котлов, паровых турбин и турбогенераторов. В состав СН входят следующие: силовая и осветительная

электросети станции, аккумуляторные установки, аварийные источники электропитания, электродвигатели всех механизмов – водяных и масляных насосов, вентиляторов, а на наиболее распространенных тепловых электростанциях – механизмов разгрузки железнодорожных вагонов, подачи топлива, угледробления и пылеприготовления. Согласно проведенным исследованиям, для пылеугольного энергоблока мощностью 200 МВт около 71% этих потерь приходится на двигатели 6 кВ и 0,4 кВ [1]. Максимальное значение этих потерь может быть определено в зависимости от типа электростанции и выра-

жено в процентах от ее установленной мощности. Для энергетической установки, исследуемой в данной работе, это значение составляет от 6,6 до 7,1% установленной мощности. Таким образом, исследования, направленные на снижение расхода электроэнергии ТЭС на собственные нужды, применительно к действующим теплоэнергетическим установкам, являются весьма актуальными.

Ранее были исследованы некоторые пути снижения расхода СН на электростанциях. В работе Г. Б. Лазарева [1] рассматриваются основные способы снижения потерь электроэнергии в технологических комплексах СН ТЭС, позволяющие повысить эффективность топливоиспользования. Один из способов заключается в применении гидромуфт, устройств, обеспечивающих регулирование частоты вращения насосных и вентиляторных установок, изменяя скольжение их приводных асинхронных двигателей. Другой способ снижения расхода электроэнергии на СН заключается в регулировании частоты вращения механизмов СН с помощью паротурбинного привода. Данный способ является типовым решением в отечественной электроэнергетике для турбопитательных насосов котлов энергоблоков мощностью 300–800 МВт. К следующему способу можно отнести электрическое регулирование, реализуемое на основе электроприводов с изменяемой частотой вращения, которое позволяет обеспечить оптимальное управление технологическими комплексами СН ТЭС. Такое регулирование является эффективным инструментом снижения потерь и увеличения рационального топливоиспользования. Именно по этой причине в мировой практике для регулирования частоты вращения асинхронных двигателей турбомеханизмов (насосов, вентиляторов) преимущественное применение получили двухзвенные преобразователи с регулируемой выходной частотой.

В работе [2] авторами рассматривается возможность повышения эффективности энергетического оборудования Тахиаташской ТЭЦ путем применения частотно-регулируемого электропривода питательного насоса мощностью 4000 кВт. На основании

выполненных расчетов авторы приходят к выводу о снижении потерь в двигателе насоса на 50 кВт/ч. Рост КПД двигателя составил 0,013%.

В работе Р. Р. Сизова [3] для снижения удельного расхода электроэнергии на СН энергоблока станционного № 8 Заинской ГРЭС предлагается изменение схемы газоздушного тракта котлоагрегата с целью снижения его сопротивления. Удаление из схемы энергетического парового калорифера и использование взамен вентилятора рециркуляции горячего воздуха для его нормативного подогрева позволили снизить расход электроэнергии на привод тягодутьевых машин. Экономия топлива от реализации указанных мероприятий с учетом работы энергоблока ст. № 8 в течение 2976 ч (фактическая наработка за 2014 г.) составила 327,4 т.у.т/год. Экономия в денежном выражении составила 1130 тыс. руб.

Для повышения эффективности работы исследуемой в данной работе энергетической установки авторами предложен альтернативный способ решения данной проблемы, связанный с включением в схему основного конденсата дополнительного насоса уплотнений питательных электронасосов (ПЭН) блока 1Кс-20-110. Рассматривается возможность модернизации технологической схемы основного конденсата энергоблока № 5 ТЭЦ-10 ООО «БЭК» с целью снижения удельного расхода электроэнергии на привод конденсатных насосов (КЭН), что позволит повысить энергетическую и экономическую эффективность эксплуатации данной установки. Для выполнения необходимых расчетов используется разработанная авторами верифицированная математическая модель данной энергоустановки.

АНАЛИЗ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЭНЕРГОБЛОКА

Технологическая схема основного конденсата энергоблока № 5 была спроектирована в середине 50-х годов прошлого века и применялась для первой серии энергетических установок данного типа. В ходе многолетней эксплуатации подобных дубль-блоков

первой серии в СССР был выявлен ряд проблем, снижающих экономичность и надежность работы данного оборудования. В ходе анализа были сформулированы технические решения, повышающие экономичность и надежность данного оборудования, что привело к многочисленным модернизациям технологических схем энергоблоков более позднего года постройки. На ТЭЦ-10 эти изменения были реализованы не в полной мере.

К одной из таких проблем относится повышенный расход электроэнергии на собственные нужды конденсатных насосов блока. На первых блоках с турбинами К-160-130 отчасти неверно были выбраны конденсатные насосы. Устанавливались три насоса типа 12КсВ 9х4 производительностью 320 м³/ч каждый, при напоре 1,56 МПа. Хотя номинальная производительность одного насоса почти соответствовала номинальной нагрузке турбины, однако в реальных условиях эксплуатации вследствие повышенного сопротивления сети и наличия значительной постоянной рециркуляции конденсата, в работе, как правило, находились два насоса, нагруженные не более чем на 50–55% каждый. Это обстоятельство приводило к значительному перерасходу электроэнергии на собственные нужды станции. Поэтому на последующих блоках перешли к установке двух новых конденсатных насосов типа 16 КсВ 11х4 производительностью 470 м³/ч каждый, при напоре 1,56 МПа. Начиная с конца 1970-х годов, насосы типа 16 КсВ 11х4 заменяются новыми унифицированными конденсатными насосами типа КсВ 500-150 производительностью 500 м³/ч при напоре 1,47 МПа» [4].

Замена действующих конденсатных насосов 12КсВ 9х4 на более подходящие по производительности КсВ 500-150³ на сегодняшний день требует весомых капиталовложе-

ний, так как стоимость только одного такого насоса в настоящее время составляет 900 тыс. руб. С другой стороны, решение данной проблемы может быть выполнено путем включения в схему основного конденсата дополнительного насоса, который будет выполнять функцию технологически необходимой рециркуляции – подачи холодного конденсата на уплотнение рабочих валов ПЭН блока в местах выхода вала из корпуса насоса с последующим его сливом в паровое пространство конденсатора. Эта необходимость обусловлена конструктивной особенностью типа используемых уплотнений питательных насосов.

Щелевые уплотнения относятся к бесконтактным уплотнениям и применяются в крупных насосах, эксплуатация которых должна быть исключительно надежной при длительных межремонтных периодах (25000 ч и более)⁴. Уплотнения этого типа негерметичны, и выброс жидкости, перемещаемой насосом, предотвращается дросселированием протечек и подводом «запирающей» жидкости с необходимым давлением от стороннего источника. Они широко распространены в питательных насосах крупных энергетических блоков⁵. Для обеспечения минимальных перетечек в уплотнениях необходимо свести к минимуму перепады давлений между подводимой холодной и «запираемой» горячей водой. Для этого устанавливают специальные регуляторы перепада давлений. Также регулирование протечек осуществляется по импульсу от температуры слива воды из уплотнений.

В действующей технологической схеме предусмотрены оба вышеперечисленных способа регулирования. Для регулирования подачи конденсата на передние уплотнения (сторона всаса) всех питательных насосов используется импульс по перепаду давлений

³Насос КсВ 500-150-1-С // Аквапрофит [Электронный ресурс]. URL: https://akvaprofit.pulscen.ru/goods/15982060-pasos_xv_500_150_1_s (19.01.2022).

⁴Зимницкий В. А., Умов В. А. Лопастные насосы: справочник. Л.: Изд-во «Машиностроение», Ленингр. отд-ние, 1986. 334 с.

⁵Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры: учеб. для теплоэнергетических специальностей вузов. М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 1984. 416 с.

⁶Общее описание конструкции турбины на примере К-160-130 [Электронный ресурс]. URL: <http://helpinginer.ru/obshhee-opisanie-konstrukcii-turbine-na-primere-k-160-130/> (19.01.2022).

в трубопроводе подачи конденсата на передние уплотнения после регулятора и в коллекторе всаса насосов. Команда подается на один общий регулятор, который поддерживает перепад 0,0294 МПа. Для регулирования подачи конденсата на заднее уплотнение (сторона напора) каждого из питательных насосов используется импульс по температуре воды, сливаемой из внутренней камеры заднего уплотнения. Команды подаются на индивидуальные регуляторы, которые поддерживают указанную температуру на уровне 70°C⁶. Следует отметить, что на практике работа данной автоматики не реализована в полной мере и расход конденсата устанавливается с некоторым запасом – для всех режимов работы с расходом «уплотняющего» конденсата как для номинального режима.

Для корректного выбора типа и модели нового элемента технологической схемы – насоса, обеспечивающего подачу конденсата на уплотнения ПЭН, необходимо определить его технические характеристики с учетом параметров рабочей среды. Действующая технологическая схема блока включает три питательных насоса: 2 насоса ПЭ-580-200 и 1 насос ПЭ-320-200. Суммарный расход конденсата, необходимого на уплотнение ПЭН блока, был определен в ходе испытаний и во всем рабочем диапазоне энергоблока составил порядка 6,67 кг/с.

Исходя из условий эксплуатации, было определено минимально допустимое давление на напоре насоса уплотнений ПЭН. Оно равняется сумме давления на всасе питательных насосов (0,7845 МПа – для номинального режима работы энергоблока), требуемого перепада давлений в трубопроводе подачи конденсата на уплотнения и коллекторе всаса ПЭН (0,0294 МПа), а также величины падения давления ввиду гидравлического сопротивления участка трубопровода от насоса уплотнений до регуляторов уплотнений ПЭН (0,034 МПа). В результате вычислений значение минимально допустимого давления, развиваемого насосом уплотнений ПЭН, составило 0,848 МПа. Учитывая все вышеперечисленные условия, был произведен выбор насоса. Насос 1Кс-20-110⁷ полностью удовлетворяет требованиям, представ-

ленным выше. Технические характеристики данного насоса представлены в табл. 1. На рис. 1 представлена его заводская напорная характеристика.

Монтаж выбранного насоса уплотнений ПЭН предлагается выполнить в прямке конденсатора турбоагрегата № 5 на отметке «-2» м для обеспечения, требуемого заводом-изготовителем кавитационного запаса (2 м). Для повышения надежности работы модернизированной схемы уплотнений ПЭН также рекомендуется установить электропривод на задвижку перед фильтром от КЭН с возможностью управления ею с блочного щита управления энергоблоком. Это мероприятие позволит повысить надежность работы оборудования – незамедлительно подать конденсат на уплотнения ПЭН от КЭН при аварийном выходе из строя насоса 1Кс20-110. Предложенная в данной работе модернизация схемы основного конденсата блока представлена на рис. 2 толстой линией.

Таблица 1. Техническая характеристика насоса 1Кс-20-110

Table 1. 1Ks-20-110 pump performance specifications

Параметр, единица измерения	Значение
Тип конструкции насоса	многоступенчатые (секционные)
Температура перекачиваемой жидкости – не более, °С	160
Масса насоса, кг	145
Номинальная подача воды, м ³ /ч	20
Напор, м	110
Максимальная потребляемая насосом мощность, кВт	13,5
КПД насоса, %	58
Частота вращения, об/мин	2950
Допускаемый кавитационный запас – не более, м	1,5
Средний ресурс до капитального ремонта, ч	32000

Для корректного отображения результатов расчетов расхода электроэнергии на СН энергоблока для различных режимов его работы для конденсатных насосов была использована математическая модель, описывающая динамику изменения напора и КПД в

зависимости от производительности. Уравнения, описывающие данные зависимости, были получены из заводской технической характеристики данного оборудования. Новый элемент технологической схемы – насос 1Кс20-110 на всех режимах работает с постоянным расходом 6,67 кг/с. Учитывая это обстоятельство, из технической характеристики насоса были взяты соответствующие данному расходу значения напора, мощности и КПД и зафиксированы в его математической модели⁸.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Все исследования и расчеты, представленные в данной работе, были выполнены с применением разработанной авторами подробной математической модели энергоблока №5 ТЭЦ-10 ООО «БЭК», описанной в [5–8]. Данная модель была построена с помощью разработанного в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН программно-вычислительного комплекса «Система машинного построения программ», позволяющего разрабатывать математиче-

ские модели сложных теплоэнергетических установок, состоящих из сотен элементов, соединенных между собой материальными и энергетическими потоками [9, 10]. Достоверность результатов вычислительных экспериментов подтверждается адекватностью математической модели энергоблока, которая была с достаточной точностью настроена с учетом фактического состояния исследуемой установки по результатам замеров контрольных параметров, выполненных в нескольких режимах работы установки.

Для верификации математической модели энергоблока использовалась разработанная авторами трехэтапная методика идентификации параметров математических моделей сложных теплоэнергетических установок [11–15]. Данная методика позволяет эффективно выявлять «плохие» замеры контрольных параметров, погрешности которых выходят далеко за границы заявленного класса точности используемых средств измерения, и добиваться высокой точности настройки коэффициентов математической модели исследуемой установки. В согласии с данной

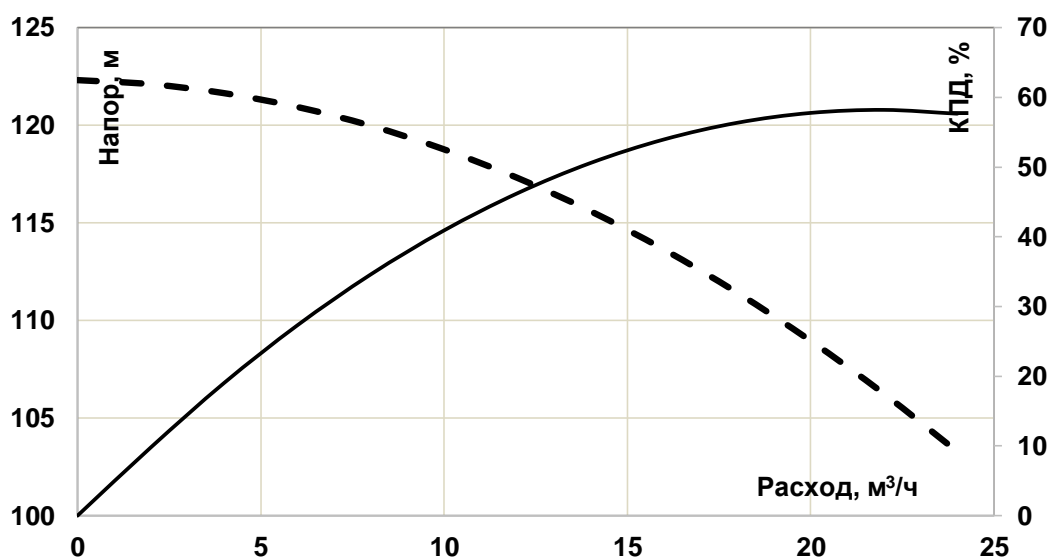


Рис. 1. Напорная характеристика насоса 1Кс-20-110
Fig. 1. Head capacity characteristic of 1Ks-20-110 pump

⁷Насосы и оборудование. Насосы 1Кс-20-110 конденсатные. [Электронный ресурс]. URL: https://www.hms-livgidromash.ru/catalog/nasosy/1ks/1ks_20_110_model_35737.html (19.01.2022).

⁸Н49.897.00.000 РЭ. Руководство по эксплуатации. Насосы центробежные конденсатные типа 1Кс и агрегаты электронасосные на их основе [Электронный ресурс]. URL: https://www.hms-livgidromash.ru/upload/iblock/abb/pasport_rukovodstvo_nasos_1Ks_N49.897.00.000.pdf (19.01.2022).

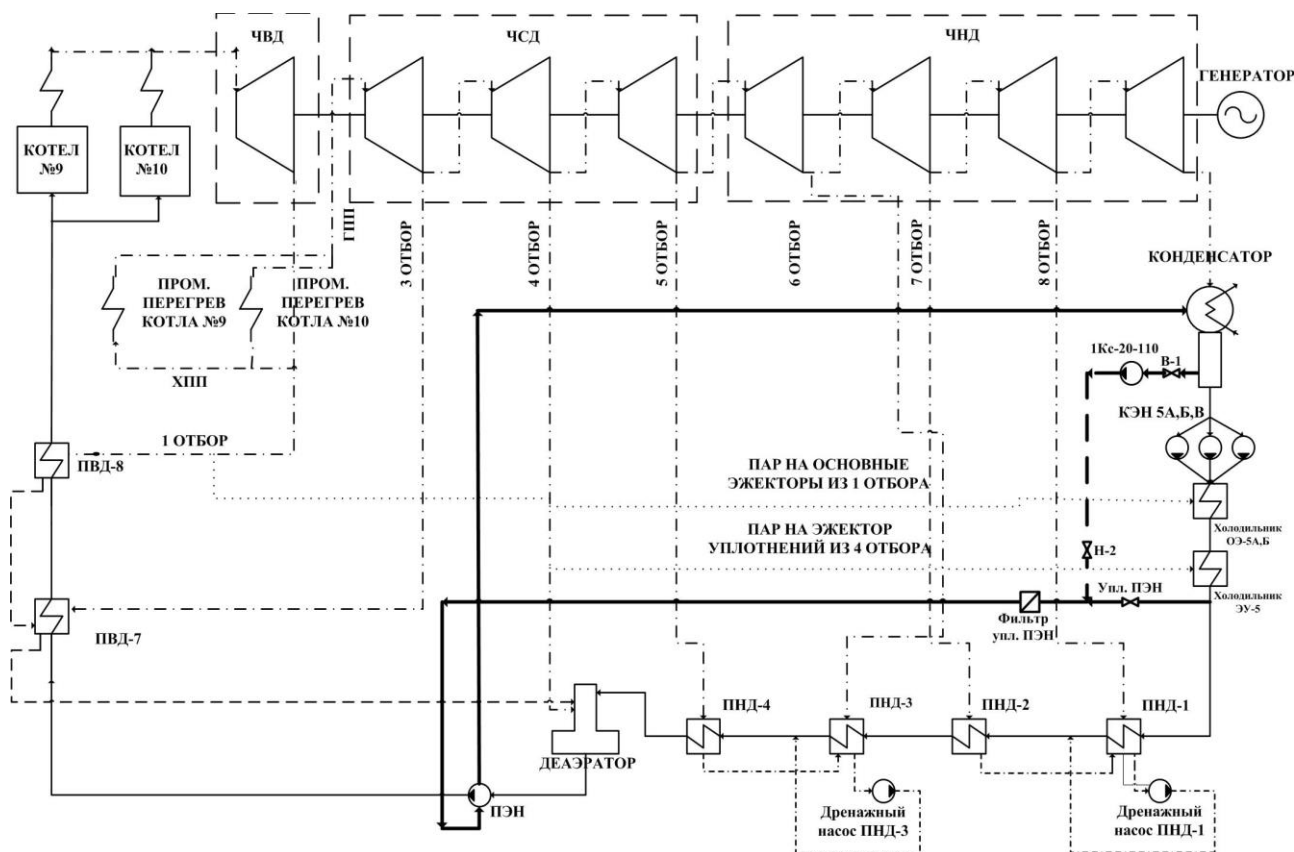


Рис. 2. Модернизация тепловой схемы основного конденсата энергоблока (ХПП – холодная нитка пара промежуточного перегрева; ГПП – горячая нитка пара промежуточного перегрева; ПЭН – питательный электронасос; КЭН – конденсатный электронасос; ЧВД – часть высокого давления;

ЧСД – часть среднего давления; ЧНД – часть низкого давления; ПВД – регенеративный подогреватель высокого давления; ПНД – регенеративный подогреватель низкого давления)

Fig. 2. Modernization of the thermal circuit of the power unit main condensate (ХПП – cold leg of steam reheat; ГПП – hot leg of steam reheat; ПЭН – feed electric pump; КЭН – condensate electric pump; ЧВД – high pressure section; ЧСД – intermediate pressure section; ЧНД – low pressure section; ПВД – high pressure regenerative heater; ПНД – low pressure regenerative heater)

методикой, первой решается оптимизационная задача на минимум максимального относительного отклонения измеряемых параметров от вычисляемых на модели. Такая постановка задачи значительно упрощает исключение выбросов («плохих» замеров). Необходимо добиться того, чтобы оптимальное значение максимального относительного отклонения составляло 3 или меньше. В таком случае по широко известному «правилу трех сигм» все случайные погрешности, распределенные по нормальному закону, можно объяснить несовершенством измерительных приборов [16]. Далее решается оптимизационная задача на минимум суммы квадратов всех относительных отклонений измеряемых параметров, которая позволяет добиться наилучшей сходимости разработанной математической модели с текущими режимами

работы действующего энергоблока [17].

Оптимизационные расчеты, необходимые для идентификации параметров и оценивания состояния математической модели энергоблока, производились модифицированным градиентным методом, разработанным в ИСЭМ СО РАН [18–20]. Данный метод позволяет решать оптимизационные задачи больших размерностей (тысячи оптимизируемых параметров, ограничений-равенств и ограничений неравенств) с высокой точностью.

ИНЖЕНЕРНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАСТРОЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОБЛОКА

Результаты расчетов математической модели для действующей и измененной схемы основного конденсата энергоблока пред-

ставлены в табл. 2. Наблюдается снижение расхода электроэнергии на СН энергоблока в диапазоне нагрузок от 137 до 150 МВт за счет отсутствия необходимости включения в параллельную работу второго КЭН. Помимо этого, следует отметить дополнительное снижение удельного расхода топлива за счет подачи холодного конденсата из конденсаторно-сборника на уплотнения ПЭН, а не предварительно нагретого в холодильниках основных эжекторов и эжектора уплотнений турбины. В результате тепло конденсата сохраняется в цикле, а не теряется напрасно с охлаждающей водой в конденсационной установке.

Расчеты модели наглядно демонстрируют возможность взятия номинальной нагрузки блока с одним работающим КЭН и насосом уплотнений ПЭН 1Кс-20-110. На рис. 3 пред-

ставлена полученная с применением настроенной математической модели зависимость расхода основного конденсата на напоре КЭН от электрической нагрузки энергоблока для действующей схемы энергоблока.

Ежегодно, преимущественно в летние периоды, ТЭЦ-10 работает с минимальным составом включенного в работу основного оборудования. В данных условиях возникает необходимость резервирования общестанционного коллектора «Впрыск 60 ата» от ПЭН энергоблока, находящегося в резерве. Для этого собираются тепловая и электрическая схемы ПЭН, открывается задвижка на резервируемый коллектор. В случае аварийного снижения в нем давления резервный ПЭН включается в работу. При сборке тепловой схемы включается КЭН блока со сбросом

Таблица 2. Результаты расчетов для действующей и измененной схемы основного конденсата энергоблока при различных режимах работы

Table 2. Calculation results for the current and modified circuit of the power unit main condensate for various operating modes

Параметры, ед. измерения	Режим 114 МВт	Режим 133 МВт	Режим 136 МВт	Режим 140 МВт	Режим 150 МВт
Напор группы конденсатных насосов (действующая тепловая схема), МПа	1,724	1,626	1,596	1,885	1,876
Напор конденсатного насоса (измененная тепловая схема; работает 1 конденсатный насос и насос уплотнений питательных электронасосов), МПа	–	–	–	1,621	1,583
Расход основного конденсата на напоре группы конденсатных насосов (действующая тепловая схема), кг/с	82,72	95,28	98,83	102,61	107,78
Расход основного конденсата на напоре конденсатного насоса (измененная тепловая схема), кг/с	–	–	–	96,03	100,25
Расход электроэнергии на перекачку основного конденсата (действующая тепловая схема), кВт	175,8	190,3	194,8	290,5	295,2
Расход электроэнергии на перекачку основного конденсата (измененная тепловая схема), кВт	–	–	–	203,2	208,4
КПД нетто энергоблока (действующая тепловая схема), %	32,852	33,648	33,489	33,014	33,305
КПД нетто энергоблока (измененная тепловая схема), %	–	–	–	33,041	33,335
Удельный расход топлива на выработку электроэнергии (действующая тепловая схема), г у.т./кВт·ч	373,98	365,13	366,86	372,14	368,89
Удельный расход топлива на выработку электроэнергии (измененная тепловая схема), г у.т./кВт·ч	–	–	–	371,84	368,56

основной части конденсата через рециркуляцию в конденсатор и открывается подача конденсата на щелевые уплотнения находящегося в резерве ПЭН. При этом по результатам проведенных замеров 50,6 кг/с конденсата сбрасываются в конденсатор, и 3,3 кг/с конденсата поступает на уплотнения ПЭН, находящегося в резерве. Предложенную в настоящей работе модернизацию технологической схемы можно применить в данных условиях для снижения расхода электроэнергии на СН. Подача конденсата на уплотнения резервного ПЭН от насоса 1Кс20-110 позволит исключить необходимость включения КЭН блока. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

В табл. 4 представлены капиталовложения, необходимые на приобретение насоса

1Кс-20-110⁹, труб соответствующих диаметров и запорной арматуры¹⁰, а также стоимость монтажных работ^{11,12}.

Из табл. 4 видно, что для реализации предложенной модернизации необходимо затратить 227900 руб. на приобретение и доставку насоса, арматуры и труб соответствующих диаметров и 60377 руб. на монтажные работы. Общие затраты на осуществление проекта составят 288277 руб.

В производственно-техническом отделе ТЭЦ-10 были получены технико-экономические показатели работы энергоблока № 5 за 2019 г. Эти данные представлены в табл. 5. Показатели экономической эффективности предложенной модернизации технологической схемы основного конденсата энергоблока приведены в табл. 6.

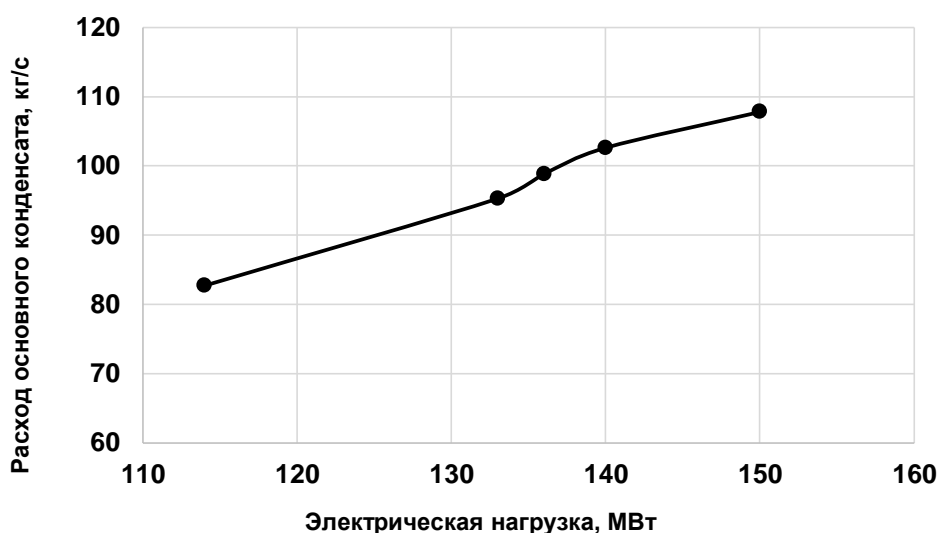


Рис. 3. Зависимость расхода основного конденсата от электрической нагрузки энергоблока
Fig. 3. Main condensate flow rate vs power unit electrical load

Таблица 3. Экономия средств в результате внедрения предложенных мероприятий
Table 3. Savings as a result of proposed activity implementation

Показатель, единица измерения	Значение
Продолжительность нахождения питательных электронасосов 5А в резерве (данные за 2019 г.), ч	360
Расход электроэнергии на привод конденсатного насоса блока (действующая схема), кВт/ч	146,8
Расход электроэнергии на привод насоса 1Кс20-110, кВт/ч	8,6
Снижение расхода электроэнергии на собственные нужды при работе по модернизированной схеме, кВт/ч	138,2
Снижение расхода электроэнергии за год (данные 2019 г.), кВт/ч	49748,4
Стоимость 1 кВт/ч потребляемой из внешней сети электроэнергии для станции (данные 2019 г.), руб.	0,82
Экономия средств по данным, руб.	40794

Таблица 4. Необходимые для модернизации схемы капиталовложения
Table 4. Investment required for circuit modernization

Наименование	Требуемое количество	Стоимость, руб.
Насос 1Кс-20-110	1 шт	203679
Доставка насоса до г. Иркутск транспортной компанией	–	5842
Изготовление фундаментной плиты насоса с монтажом крепежных болтов насоса и электродвигателя	–	19825
Труба 89х3,5мм (ст.20 ГОСТ 8732-78)	8 м	2768
Труба 57х3,5мм (ст.20 ГОСТ 8732-78)	3 м	661
Задвижка d,50 30С41НЖ Р _y 16	1 шт	3900
Задвижка d,80 30С41НЖ Р _y 16	1 шт	5600
Клапан обратный d,50	1 шт	550
Доставка труб и арматуры	–	4900
Монтаж насоса, трубопроводов и арматуры	–	29672
Электромонтажные работы (подключение насоса, прокладка кабеля, материалы)	–	10880
ИТОГО:	–	288277

Таблица 5. Техничко-экономические показатели работы энергоблока за 2019 г.
Table 5. Technical and economic performances of the power unit for 2019

Показатель, единица измерения	Значение
Продолжительность работы, ч	4679
Продолжительность работы с N _{эл.} ≥ 137 МВт, ч	378
Выработка электроэнергии, кВт·ч	499441394
Удельный расход условного топлива, г.у.т/кВт·ч	391,3
Средняя цена условного топлива, руб/т.у.т.	2227,65

Таблица 6. Показатели энергетической эффективности модернизации тепловой схемы энергоблока
Table 6. Indicators of energy efficiency of power unit thermal circuit modernization

Показатель, единица измерения	Значение
Снижение удельного расхода топлива, г.у.т/кВт·ч	0,32
Экономия топлива за год, т.у.т.	17,42
Экономия средств (работа энергоблока с N _{эл.} ≥137 МВт), руб.	38801
Экономия средств (резервирование коллектора «Впрыск 60 ата»), руб.	40794
Общая экономия средств, руб.	79596
Дополнительные капиталовложения, руб.	288277
Дополнительные затраты на амортизацию, руб.	14414
Экономический эффект, %	23
Срок окупаемости, год	4,4

⁹Цена на конденсатные насосы типа 1Кс в г. Санкт-Петербург // ООО «ЛенЭлектроМаш» [Электронный ресурс]. URL: <http://lemspb.ru/kondensatnye-tipa-1ks/1ks20-110/> (23.01.2022).

¹⁰Металлопрокат в ассортименте // Компания ПКФ «Айсберг АС» [Электронный ресурс]. URL: <https://metall-38.ru/> (23.01.2022).

¹¹Гондарь А. В., Трофимов Ю. В., Шар Б. И., Осипов О. Б. Базовые цены на работы по ремонту энергетического оборудования, адекватные условиям функционирования конкурентного рынка услуг по ремонту и техперевооружению. М., 2002 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293831/4293831782.htm> (24.01.2022).

¹²Трофимов Ю. В., Шар Б. И. РД 153-34.1-20.607-2002 Методические указания по формированию смет и калькуляций на ремонт энергооборудования. М., 2002 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294817/4294817167.htm> (19.01.2022).

Табл. 6 демонстрирует, что при работе энергоблока № 5 в течение года с $N_{эл} \geq 137$ МВт продолжительностью 378 ч (16 сут) и нахождении в резерве ПЭН, входящих в его состав, в течение 360 ч (15 сут), срок окупаемости предложенной модернизации его технологической схемы составит 4 года 5 мес. Следует отметить, что в последние два года для генерирующего оборудования ТЭЦ-10 преобладают диспетчерские графики с минимальными электрическими нагрузками. Если в обозримом будущем на рынке мощности произойдут перемены и число часов работы оборудования сместится в зону номинальных нагрузок, то срок окупаемости предложенной модернизации может значительно сократиться. Так, по данным за 2015 г. продолжительность работы энергоблока № 5 с $N_{эл} \geq 137$ МВт составила 2173 ч (3 мес.). В этом случае затраты окупятся бы за 1 год и 2 месяца, а экономический эффект был бы равен 87%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В действующей технологической схеме основного конденсата энергоблока № 5 ТЭЦ-10 ООО «БЭК» были выявлены потери, которые приводят к повышенному расходу электроэнергии на собственные нужды. Авторами был предложен оригинальный подход модернизации тепловой схемы основного кон-

денсата энергоблока, заключающийся во включении в схему основного конденсата дополнительного насоса уплотнений питательных электронасосов блока.

Перераспределение потока основного конденсата между конденсатными насосами энергоблока и предлагаемым насосом уплотнений 1Кс-20-110, согласно расчетам настроенной математической модели энергоблока, приведет к снижению удельного расхода топлива на выработку электроэнергии на 0,32 г.у.т/кВт·ч в диапазоне электрических нагрузок от 137 до 150 МВт. В результате КПД нетто энергоблока увеличится на 0,03%. Учитывая технико-экономические показатели работы энергоблока за 2019 г., в этом диапазоне электрических нагрузок экономия средств составила бы 78030 руб.

Представленная авторами модернизация позволяет уменьшить удельный расход электроэнергии на собственные нужды энергоблока и, следовательно, повысить эффективность работы исследуемого оборудования при сохранении надежности в условиях реальной эксплуатации. Кроме того, данная работа демонстрирует высокую эффективность применения аппарата математического моделирования при исследовании и оптимизации действующих теплоэнергетических установок и электростанций.

Список источников

1. Лазарев Г. Б. Управление эффективностью механизмов собственных нужд ТЭС // Научно-технический журнал «Энергия единой сети». 2012. № 5. С. 58–67.
2. Нажимова А. М., Хабибулина А. Х. Энергоресурсосбережение в системе собственных нужд теплоэлектростанции // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 293–297.
3. Сизов Р. Р. Снижение удельного расхода электроэнергии на собственные нужды энергоблока ст. № 8 Заинской ГРЭС // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2015. № 3. С. 129–131.
4. Соболев С. П. Паровая турбина К-160-130 ХТГЗ. М.: Изд-во «Энергия», 1980. 192 с.
5. Забуга Ф. В. Использование математической модели паровой турбины К-160-130 для модернизации ее технологической схемы // Системные исследования в энергетике: тр. молодых ученых ИСЭМ СО РАН. Вып. 47. Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2017. С. 56–61.
6. Забуга Ф. В. Использование математической модели энергоблока для модернизации его технологической схемы // Системные исследования в энергетике: тр. молодых ученых Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. Вып. 48. Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2016. С. 51–56.
7. Забуга Ф. В., Алексеюк В. Э. Исследования на основе математического моделирования энергоблока № 5 ТЭЦ-10 ООО «Байкальская Энергетическая Компания» для оценки эффективности его модернизации // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 2. С. 183–195. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-183-195>.
8. Zabuga F., Alekseiuk V. Research based on mathematical modeling of CHP-10 power unit No 5 “Baikal Energy Company” LLC to assess the efficiency of its modernization // Energy Systems Research 2021: Proceedings International Conference of Young Scientists. E3S Web Conference. 2021. Vol. 289. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128902002>.
9. Клер А. М., Деканова Н. П., Скрипкин С. К., Михеев А. В., Корнеева З. Р., Орехов А. Б. Математическое моделирование и оптимизация в задачах оперативного управления тепловыми электростанциями. Новоси-

бирск: «Наука», Сиб. предприятие РАН, 1997. 120 с.
10. Клер А. М., Тюрин Э. А. Оптимизационные исследования энергетических установок и комплексов. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2016. 298 с.
11. Alexeyuk V. E. An improved technique for identification of mathematical models of thermal power equipment // *Energy Systems Research*. 2018. Vol. 1. No. 3. P. 53–60. <https://doi.org/10.25729/esr.2018.03.0007>.
12. Алексеюк В. Э., Максимов А. С., Сафронов П. Г. Усовершенствованная методика идентификации математических моделей теплоэнергетического оборудования // *iPolytech Journal*. 2019. Т. 23. № 3. С. 503–515. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-503-515>.
13. Клер А. М., Алексеюк В. Э. Повышение точности идентификации параметров математических моделей существующего теплоэнергетического оборудования // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. 2019. № 3. С. 57–76. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2019-3-57-76>.
14. Kler A., Alekseiuk V., Maksimov A. An improved technique for identification of mathematical model parameters of thermal power equipment and assessment of its performance // *Energy Systems Research 2019: Proceedings International Conference of Young Scientists*. E3S Web Conferences. 2019. Vol. 114.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911406009>.
15. Alekseiuk V. Improving the efficiency of the three-stage technique of mathematical model identification of complex thermal power equipment // *ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management: Proceedings E3S Web Conferences*. 2020. Vol. 209. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903002>.
16. Гамм А. З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. М.: Изд-во «Наука», 1976. 220 с.
17. Huber P. J. Robust statistics. New York: John Wiley & Sons, 1981. 308 p.
18. Клер А. М. Эффективные методы схемно-параметрической оптимизации сложных теплоэнергетических установок: разработка и применение. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2018. 145 с.
19. Kler A. M., Zharkov P. V., Epishkin N. O. Parametric optimization of supercritical power plants using gradient methods // *Energy*. 2019. Vol. 189. P. 116230. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116230>.
20. Kler A. M., Potanina Y. M., Marinchenko A. Y. Co-optimization of thermal power plant flowchart, thermodynamic cycle parameters, and design parameters of components // *Energy*. 2020. Vol. 193. P. 116679. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116679>.

References

1. Lazarev G. B. Efficiency management of thermal power plant auxiliaries. *Nauchno-tekhnicheskij zhurnal «Energiya edinoj seti» = Energy of Unified Grid, Scientific and Technical Journal*. 2012;5(5):58-67. (In Russ.).
2. Najimova A. M., Habibulina A. T. Energy resource-saving in a thermal power plant auxiliary // *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы = Electrotechnical Systems and Complexes*. 2013;21:293-297. (In Russ.).
3. Sizov R. R. Reducing the specific consumption of electrical energy for own needs of the power unit auxiliaries of station No. 8 of the Zainskaya state district power station. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Bulletin of the Kazan State Power Engineering University*. 2015;3(27):129-131. (In Russ.).
4. Sobolev S. P. *K-160-130 HTGZ steam turbine*. Moscow: Energiya; 1980, 192 p. (In Russ.).
5. Zabuga F. V. Using K-160-130 steam turbine mathematical model for its process scheme modernization. In: *Sistemnye issledovaniya v energetike: trudy molodyh uchenyh Instituta sistem energetiki imeni L.A. Melent'eva SO RAN = System research in power engineering: works of young scientists of Melentiev Energy Systems Institute SB RAS*. Iss. 47. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of sciences; 2017, p. 56–61. (In Russ.).
6. Zabuga F. V. Using power unit mathematical model for its technological scheme modernization. In: *Sistemnye issledovaniya v energetike: trudy molodyh uchenyh Institutov sistem energetiki imeni L.A. Melent'eva SO RAN = System research in power engineering: works of young scientists of Melentiev Energy Systems Institute SB RAS*. Iss. 48. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute of the

Siberian Branch of the Russian Academy of sciences; 2016, p. 51–56. (In Russ.).
7. Zabuga F. V., Alekseyuk V. E. Mathematical modelling of the CHP plant-10 power unit No 5 of “Baikal Energy Company” LLC to assess the efficiency of its modernisation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):183-195. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-183-195>.
8. Zabuga F., Alekseiuk V. Research based on mathematical modeling of CHP-10 power unit No. 5 “Baikal Energy Company” LLC to assess the efficiency of its modernization. In: *Energy Systems Research 2021: Proceedings International Conference of Young Scientists*. E3S Web Conference. 2021;289. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128902002>.
9. Kler A. M., Dekanova N. P., Skripkin S. K., Mikheev A. V., Korneeva Z. R., Orekhov A. B. *Mathematical modeling and optimization in operational problems of thermal power plants*. Novosibirsk: Nauka; 1997, 120 p. (In Russ.).
10. Kler A. M., Tyurina E. A. *Optimization studies of power plants and complexes*. Novosibirsk: Geo; 2016, 298 p. (In Russ.).
11. Alexeyuk V. E. An improved technique for identification of mathematical models of thermal power equipment. *Energy Systems Research*. 2018;1(3):53-60. <https://doi.org/10.25729/esr.2018.03.0007>.
12. Alekseyuk V. E., Maksimov A. S., Safronov P. G. Improved identification methods for thermal power equipment mathematical models. *iPolytech Journal*. 2019;23(3):503-515. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-503-515>.

13. Kler A. M., Alekseyuk V. E. Improving the accuracy of identifying mathematical model parameters of the existing thermal power equipment. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*. 2019;3:57-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2019-3-57-76>.
14. Kler A., Alekseiuk V., Maksimov A. An improved technique for identification of mathematical model parameters of thermal power equipment and assessment of its performance. In: *Energy Systems Research 2019: Proceedings International Conference of Young Scientists. E3S Web Conferences*. 2019;114. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911406009>.
15. Alekseiuk V. Improving the efficiency of the three-stage technique of mathematical model identification of complex thermal power equipment. In: *ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management: Proceedings E3S Web Conferences*. 2020;209.

- <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903002>.
16. Gamm A. Z. *Statistical methods of electric power systems state estimation*. Moscow: Nauka; 1976, 220 p. (In Russ.).
17. Huber P. J. *Robust statistics*. New York: John Wiley & Sons; 1981, 308 p.
18. Kler A. M. *Effective methods of circuit-parametric optimization of complex thermal power plants: development and application*. Novosibirsk: Geo; 2018, 145 p. (In Russ.).
19. Kler A. M., Zharkov P. V., Epishkin N. O. Parametric optimization of supercritical power plants using gradient methods. *Energy*. 2019;189:116230. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116230>.
20. Kler A. M., Potanina Y. M., Marinchenko A. Y. Co-optimization of thermal power plant flowchart, thermodynamic cycle parameters, and design parameters of components. *Energy*. 2020;193:116679. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116679>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Забуга Федор Викторович,
аспирант,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
инженер-технолог 2 категории
ООО «Инженерный центр «Иркутскэнерго»,
664043, г. Иркутск, б-р Рябикова, 67, Россия

Алексеюк Виталий Эдуардович,
кандидат технических наук,
младший научный сотрудник
Отдела теплосиловых систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 08.02.2022; одобрена после рецензирования 26.04.2022; принята к публикации 17.08.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fedor V. Zabuga,
Postgraduate Student,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
2nd Category Industrial Engineer,
Engineering Center “Irkutskenergo” LLC,
67 Ryabikova Blvd, Irkutsk 664043, Russia

Vitaliy E. Alekseyuk,
Cand. Sci. (Eng.),
Junior Researcher,
Department of Heat Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 08.02.2022; approved after reviewing 26.04.2022; accepted for publication 17.08.2022.



Научная статья

УДК 621.311.25

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-439-450>

Расчет инсоляции солнечной фотоэлектрической электростанции с учетом геолокационных и погодных параметров

Юрий Васильевич Коновалов¹✉, Алексей Нурисламович Хазиев²¹*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*²*Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Россия*¹*yrvaskon@mail.ru, orcid.org/0000-0003-2557-8477*²*uxaziewaaa@gmail.com*

Резюме. Цель – разработать методику расчета инсоляции солнечной фотоэлектрической электростанции с учетом максимального количества значимых входных параметров и ее территориальной адаптации. При решении поставленной задачи применялось имитационное моделирование, реализованное средствами MATLAB. Используются функциональные возможности по синтезу моделей из имеющихся элементов с интеграцией алгоритмов и результатов моделирования между блоками подсистемы Simulink. В качестве значимых входных параметров рассматривались географические координаты, местное время, угол наклона приемной солнечной панели, моделируемый день, коэффициент прозрачности атмосферы, альbedo и азимутальный угол. Разработана компьютерная модель солнечной фотоэлектрической электростанции, позволяющая исследовать работу фотоэлектрических элементов в зависимости от координат их установки, геометрических параметров солнечных панелей, температуры и отражающей способности окружающей среды. При моделировании работы солнечной электростанции визуализируются графические зависимости солнечной инсоляции от угла наклона солнечной панели, от прозрачности атмосферы, от географических координат объекта, от текущего месяца или дня года. Анализ результатов показал, что варьирование угла наклона солнечной панели на 15° модифицирует солнечную инсоляцию на 10–15%, изменение коэффициента прозрачности атмосферы на 20% приводит к изменению уровня инсоляции на 30–50%, суточные суммы инсоляций в течение года для г. Ангарск подвергаются модификации от 1000 до 6500 Вт/м². Представленные результаты исследования регионально адаптированной фотоэлектрической электростанции показали необходимость учета геолокационных и погодных параметров при расчете инсоляции для определения целесообразности ее применения. Предложенная математическая модель расчета солнечной инсоляции для фотоэлектрической электростанции может быть использована при проектировании и оптимизации систем энергоснабжения в комбинации с данными солнечными фотоэлектрическими электростанциями.

Ключевые слова: солнечная электростанция, моделирование, инсоляция, координаты, погодные условия, MATLAB

Для цитирования: Коновалов Ю. В., Хазиев А. Н. Расчет инсоляции солнечной фотоэлектрической электростанции с учетом геолокационных и погодных параметров // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 439–450. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-439-450>.

ENERGY INDUSTRY

Original article

Insolation calculations of a photovoltaic power plant taking into account location-based and weather parameters

Yuri V. Konovalov¹✉, Aleksey N. Khaziev²¹*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*²*Angarsk State Technical University, Angarsk, Russia*¹*yrvaskon@mail.ru, orcid.org/0000-0003-2557-8477*²*uxaziewaaa@gmail.com*

Abstract. In this study, we set out to develop a methodology for calculating insolation of a photovoltaic power plant taking into account the maximum number of significant input parameters and its territorial adaptation. To this end, simulation modelling implemented in the MATLAB environment was used. Functional possibilities for the synthesis of models using existing elements with the integration of algorithms and modelling results between the blocks of the Simulink subsystem were used. In terms of significant input parameters, geographical coordinates, local time, tilt of the receiving solar panel, modelled day, atmospheric transparency coefficient, albedo and azimuthal angle were considered. A computer model of a photovoltaic power plant was developed for investigating the operation of photovoltaic cells depending on the coordinates of their installation, geometric parameters of solar panels, as well as the temperature and reflectivity of the environment. The performed modelling of the photovoltaic power plant operation visualised graphic dependences of insolation on the tilt of the solar panel, atmospheric transparency coefficient, geographical coordinates of the object and the current month or day. According to the analysis, 15° variations in the solar panel tilt modifies insolation by 10–15%, while variations in the atmospheric transparency coefficient result in 30–50% variations of insolation. As a result, the daily insolation values for the city of Angarsk throughout a year can be modified by 1000–6500 W/m². The presented results of investigating a regionally adapted photovoltaic power plant demonstrated the need for accounting for location-based and weather parameters during the calculation of insolation for determining the applicability of a plant. The proposed mathematical model for calculating insolation of a photovoltaic power plant can be used for the design and optimization of power supply systems in combination with the specified photovoltaic solar power plants.

Keywords: solar power plant, modeling, insolation, coordinates, weather conditions, MATLAB

For citation: Konovalov Yu. V., Khaziev A. N. Insolation calculations of a photovoltaic power plant taking into account location-based and weather parameters. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):439-450. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-439-450>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время такие виды традиционного топлива, как уголь, газ и нефтепродукты, не являются безусловными лидерами в процессе выработки электрической энергии. Традиционные системы электроснабжения, как бы они не развивались технически, уступают место либо полностью возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), либо комбинированным в сочетании с отдельными видами ВИЭ. Рост доли ВИЭ с 24% в 2021 г. достигнет уровня около 50% в 2040 г. Выбор определенного вида ВИЭ выполняется исходя из экономических и технических показателей для заданных условий [1–6]. Поэтому одной из главных проблем гарантированного энергоснабжения является адаптация и интеграция ВИЭ в существующие системы электроснабжения (СЭС). В связи с этим мировая тенденция развития цифровых технологий в совокупности с внедрением альтернативной энергетики ставит задачу развития методов компьютерного моделирования режимов работы существующих СЭС в совокупности с ВИЭ [7–16]. Эта проблема связана с необходимостью учитывать множество входных параметров, имеющих стохастический характер, и при отсутствии детерминированных связей между режимами энергопотребления и приоритетностью использования отдельно-

го вида ВИЭ. По комплексу интегральных показателей наиболее перспективным источником из существующих ВИЭ во многих случаях является солнечная энергетика. Поэтому солнечные фотоэлектрические электростанции (СФЭС) занимают значительную долю в выработке электроэнергии среди электростанций на ВИЭ. В этом случае актуальной задачей становится расчет солнечного излучения, принимаемого панелями СФЭС, являющегося функцией многих переменных, таких как географическое положение, погодные условия, градация изменения уровня инсоляции от варьирования азимутального и относительно земли углов наклона панелей, разного альbedo подстилающей поверхности, влияющего на отражательную способность поверхности. Решение этой задачи путем компьютерного моделирования позволит оценить целесообразность использования СФЭС и ее оптимальную конфигурацию.

МЕТОДЫ

В качестве инструмента моделирования выбрана подпрограмма Simulink, которая позволяет реализовать функциональные возможности синтеза моделей из имеющихся элементов с интеграцией алгоритмов и результатов моделирования между блоками подсистемы Simulink (рис. 1).

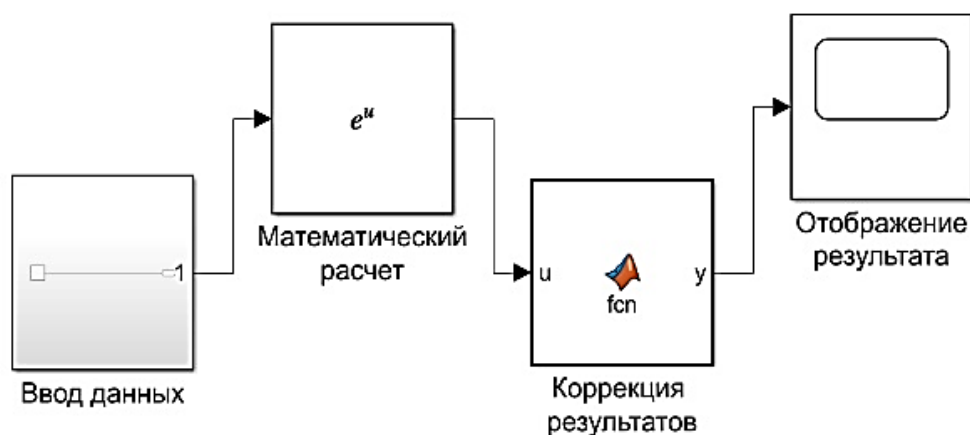


Рис. 1. Структурная схема модели расчета солнечной инсоляции
Fig. 1. Structural diagram of the solar insolation calculation model

Структура модели расчета солнечной инсоляции наглядно показывает, что ее можно разделить на ряд подсистем. Этими подсистемами, в соответствии с рис. 1, являются:

Блок ввода данных: введенные переменные расчета инсоляции записываются и отправляются в последующие блоки. Присваивает некоторые переменные глобальному типу. Состоит из следующих элементов: «Constant», «Signal builder».

Блок математических расчетов: в подсистему входит ряд блоков, последовательно осуществляющих операции умножения, деления, интегрирования и тригонометрические функции. При этом выполняется расчет параметров солнечной инсоляции, значение которых необходимо знать для определения ориентации солнечного приемника. Связь блоков между собой организована элементами «Go to», «From», это позволяет визуально не усложнять схему расчета. В состав входят следующие функциональные элементы: «Product», «Trigonometric functions block», «Gain», «Sum», «Subtract», «Integrator».

Блок коррекции результатов: подсистема выполняет функцию контроля значений полученных в блоке математических расчетов, при необходимости корректирует результаты, а также вносит стохастический характер в график инсоляции. В его составе имеются элементы: «Saturation», «Matlab function», «Random number generator».

Блок отображения результатов: подси-

стема фиксирует промежуточные функциональные зависимости, формирует базы данных, и с помощью элемента «To workspace» конечный результат направляет в рабочую область MATLAB в виде суточного графика. Содержит блоки: «Display», «Score».

Эксплуатационные характеристики СФЭС в основном определяются величиной полученного солнечного излучения и погодных условий. Для определения солнечной энергии, доступной для трансформирования СФЭС, необходимо определить количественную величину солнечного излучения в зависимости от координат установки СФЭС, геометрических параметров панелей СФЭС, температуры и отражающих способностей окружающей среды³ [17–19].

Для повышения поступления солнечной инсоляции принимающую поверхность стараются поворачивать перпендикулярно к солнцу, т.е. так, чтобы угол между солнцем и принимающей панелью был минимальным. На рис. 2 показаны характеристики, задающие расположение приемной площадки относительно положения солнца, где β – угол наклона панели относительно земли; γ – азимутальный угол установки приемной панелью, град.; ϱ_z – зенитный угол, град.; ϱ – угол падения солнечного излучения, град.; 1 и 2 – нормали к горизонтальной и наклонной плоскостям; W , S , E , N – стороны света, соответственно.

³Попель О. С., Фрид С. Е., Киселева С. В., Коломиец Ю. Г., Лисицкая Н. В. Климатические данные для возобновляемой энергетики России (База климатических данных): учеб. пособ. М.: Изд-во МФТИ, 2010. 56 с.

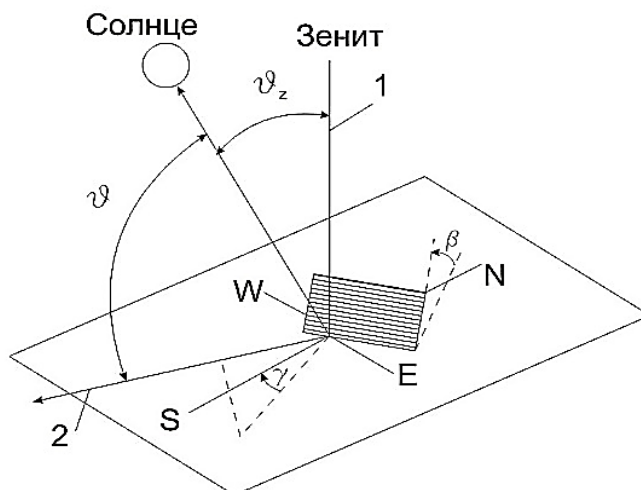


Рис. 2. Характеристики ориентации солнечного приемника
Fig. 2. Solar receiver orientation characteristics

Предлагается методика вычисления инсоляции в соответствии с известными положениями⁴⁻⁶ [20–22], отличающаяся комплексным учетом программируемых параметров, наиболее полно характеризующих условия функционирования фотоэлектрической электростанции. Инсоляция является интегральной величиной солнечной радиации земной поверхности.

Суммарная солнечная радиация равна сумме прямой, рассеянной и отраженной инсоляций:

$$I_{\text{сум}}^{\beta\gamma} = I_{\text{пр}}^{\beta\gamma} + I_{\text{расс}}^{\beta\gamma} + I_{\text{отр}}^{\beta\gamma} = I_{\text{пр}}^{\text{гор}} \frac{\cos \vartheta_z}{\vartheta} + I_{\text{расс}}^{\text{гор}} \frac{1 + \cos \beta}{\vartheta} + \rho I_{\text{сум}}^{\text{гор}} \frac{1 - \cos \beta}{\vartheta}, \quad (1)$$

где $I_{\text{пр}}^{\beta\gamma}$, $I_{\text{расс}}^{\beta\gamma}$, $I_{\text{отр}}^{\beta\gamma}$ – значения прямой, рассеянной от облаков и аэрозолей, и отраженной от земной поверхности радиации на наклонную поверхность, соответственно; $I_{\text{пр}}^{\text{гор}}$, $I_{\text{расс}}^{\text{гор}}$, $I_{\text{сум}}^{\text{гор}}$ – значения прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации, падающей

на горизонтальную поверхность; ρ – альbedo земной поверхности.

Величина угла ϑ определяется из решения уравнения:

$$\cos \vartheta = (A - B) \cdot \sin \sigma + [C \cdot \sin \omega + (D + E) \cdot \cos \omega] \cdot \cos \sigma. \quad (2)$$

Коэффициенты A , B , C , D , E вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} A &= \sin \phi \cdot \cos \beta; & B &= \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma; \\ C &= \sin \beta \cdot \sin \gamma; & D &= \cos \phi \cdot \cos \beta; \\ E &= \sin \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma, \end{aligned} \quad (3)$$

где ϕ – широта местности в точке установки панелей, град.; σ – угол склонения Солнца, град.; γ – азимутальный угол установки приемной площадки, который при направлении на юг, град.; $\gamma = 0^\circ$, при отклонении к востоку γ считается положительным, при отклонении к западу – отрицательным; ω – часовой угол Солнца, град.

⁴Surface meteorology and Solar Energy. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> (17.02.2022).

⁵Прокопеня И. Н., Петровская Т. А., Богдан А. А., Игнатович Р. С., Павлович И. В. Исследование фотоэлектрического преобразователя энергии – солнечной батареи: для энергетических специальностей ВУЗа. Минск: Изд-во БНТУ, 2018. 57 с.

⁶Гусаров А. В., Наумов Э. П. Практические и семинарские занятия по курсу Гидрология и климатология: учеб.-метод. рук-во. Казань: Изд-во КФУ, 2014. 17 с.

Зенитный угол Солнца определяется по выражению:

$$\vartheta_z = \arccos[\sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega]. \quad (4)$$

Угол высоты подъема Солнца над горизонтом h вычисляется по формуле:

$$h = 90^\circ - \vartheta_z. \quad (5)$$

Азимутальный угол положения Солнца A_z является решением уравнения:

$$\cos A_z = \frac{\sin \phi \cdot \sin h - \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos h}. \quad (6)$$

Часовой угол вычисляется по формуле:

$$\omega = 15 \cdot (t - 12 - T_{\text{ув}} - \Delta T_{\text{UTC}}) + \psi, \quad (7)$$

где t – текущее официальное местное время, ч; ΔT_{UTC} – разница между местным официальным временем и средним временем по Гринвичу, ч; ψ – географическая долгота точки размещения приемной площадки, град.

Временная поправка на уравнение времени определяется по формуле:

$$T_{\text{ув}} = 0,11 \cdot \sin(2B) - 0,08 \cdot \cos(B) - \sin(B), \quad (8)$$

где $B = (0,986 \cdot N - 79,866)$, град.; N – номер календарного дня с начала года.

Угол склонения находится по формуле:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin(0,986 \cdot N + 280,024). \quad (9)$$

Углы восхода ω_n и заката ω_k Солнца по солнечному времени определяются из выражений:

$$\omega_n, \omega_k = 0 \pm \arccos[-\tan \phi \cdot \tan \delta]. \quad (10)$$

Для учета реальных характеристик солнечной радиации, приходящей на опреде-

ленную территорию, при моделировании используются средние для заданного месяца значения индекса прозрачности атмосферы K_T , полученные из базы данных космического агентства США NASA SSE [21, 22] за более чем двадцатилетний период наблюдений. При этом считается, что индекс прозрачности для текущих суточных значений солнечной радиации равен его среднесуточному значению для данного месяца:

$$K_T = \frac{I_{\text{сум}}^{\text{гор}}}{I_0}, \quad (11)$$

где I_0 – внеатмосферная радиация на горизонтальную поверхность, которая определяется по формуле:

$$I_0 = I_{\text{sun}} \cdot [1 + 0,033 \cos(0,986 \cdot N)] \cdot \vartheta_z, \quad (12)$$

где $I_{\text{sun}} = 1367$ – солнечная постоянная, Вт/м².

Величина рассеянной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, определяется через диффузный коэффициент K_d , характеризующий долю рассеянной радиации в суммарном излучении:

$$K_d = \frac{I_{\text{расс}}^{\text{гор}}}{I_{\text{сум}}^{\text{гор}}}. \quad (13)$$

Для нахождения K_d используется методология NASA [22], по которой доля рассеянной радиации определяется из системы полиномиальных уравнений в функции от широты местности, индекса прозрачности, часового угла заката и полуденного угла высоты Солнца над горизонтом.

В итоге солнечная инсоляция за сутки определяется по формуле:

$$W_{\text{сут}}(N) = \int_0^{24} I_{\text{сум}}^{\text{гор}} dt. \quad (14)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для получения результатов расчета инсоляции СФЭС в блок ввода данных заносятся входные параметры для расчета, такие как географические координаты – широта и долгота, разница между местным официальным временем и средним временем по Гринвичу, угол наклона приемной солнечной панели, моделируемый день (номер дня с начала года), коэффициент прозрачности атмосферы, альbedo и азимутальный угол. На рис. 3 отображено окно ввода основных параметров, влияющих на значение инсоляции, значение которой выводится в виде графика.

Для необорудованных системой трекинга панелей по солнцу имеет смысл определять оптимальный угол наклона приемной солнечной панели, который вследствие вращения земли вокруг солнца в течение года меняется⁷ [23]. Соответствующее изменение инсоляции летним днем в г. Ангарск, в зависимости от угла наклона солнечной панели, показано на рис. 4. Как видно из графиков рис. 4, изменение угла наклона панели на 15° уменьшает или увеличивает инсоляцию (при неизменных остальных параметрах) на 10–15%. Доля солнечной радиации, доходящей до поверхности земли, определяется коэффициентом прозрачности (K). Изменение

этого коэффициента обусловлено преимущественно изменениями аэрозольной составляющей и влагосодержанием атмосферы. График значений инсоляции от изменения коэффициента прозрачности атмосферы показан на рис. 5. Вариация данного коэффициента на 20% приводит к изменению уровня инсоляции на 30–50%.

Изменение долготы местности приемной панели напрямую влияет на время восхода, заката солнца, т.е. меняется часовой пояс. На рис. 6 отражено изменение графика инсоляции от долготы: например, 102° восточной долготы соответствует г. Ангарск, 92° – г. Красноярск, 72° – г. Омск. Исследование влияния географических координат показало, что наибольшее влияние на инсоляцию оказывает значение координаты – широта.

Солнечная инсоляция значительно меняется в течение года вследствие изменения альbedo поверхности, положения солнца, прозрачности атмосферы. Сравнение графиков для трех разных месяцев года (декабрь, март и июль) показано на рис. 7, из него видно изменение времени продолжительности солнечного сияния и размера инсоляции. На рис. 8 показано изменение суточных сумм инсоляции в течение года. В январе суточная инсоляция составляет около 1000 Вт/м^2 , а в июле достигает 6500 Вт/м^2 .

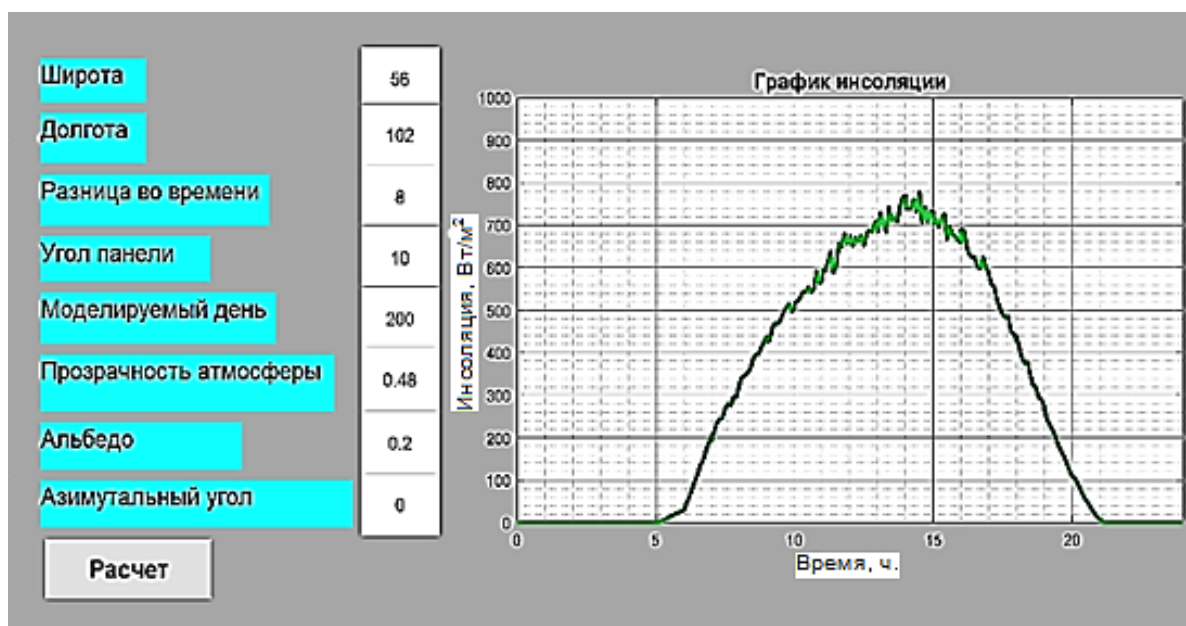


Рис. 3. Графическое окно ввода параметров расчета
Fig. 3. Graphical input window for calculation parameters

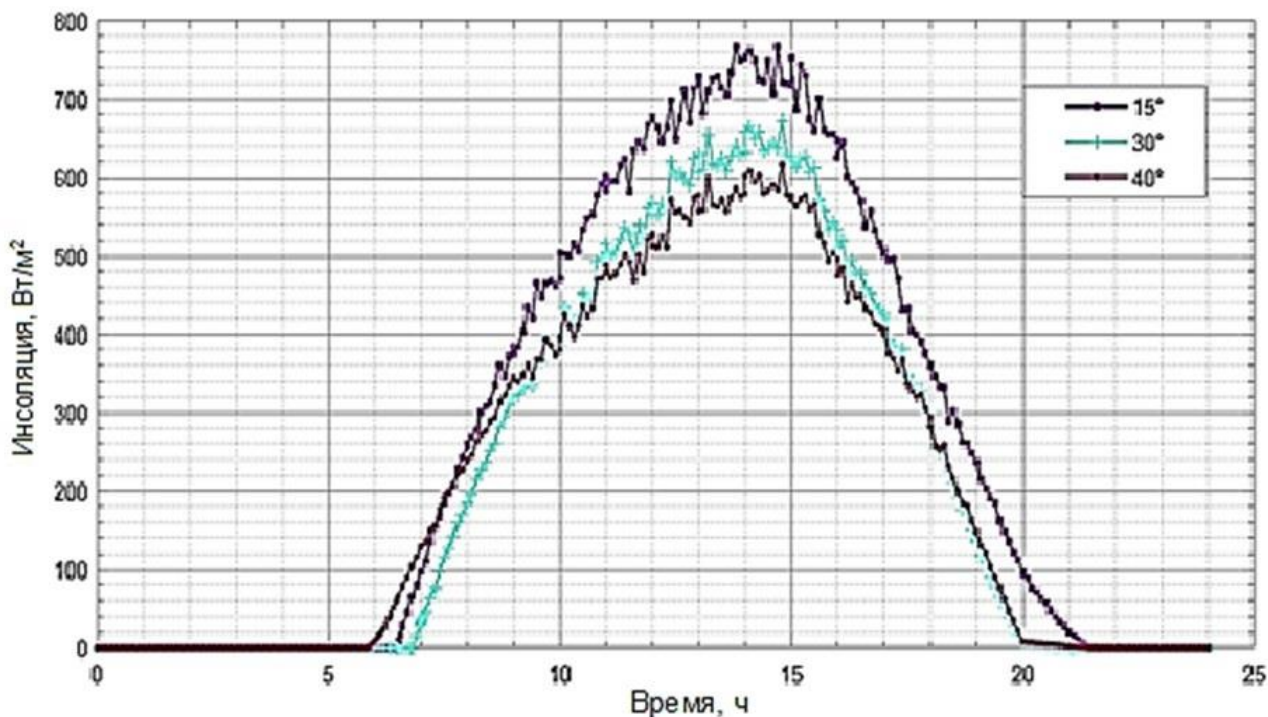


Рис. 4. График инсоляции в зависимости от угла панели
Fig. 4. Insolation vs the panel angle

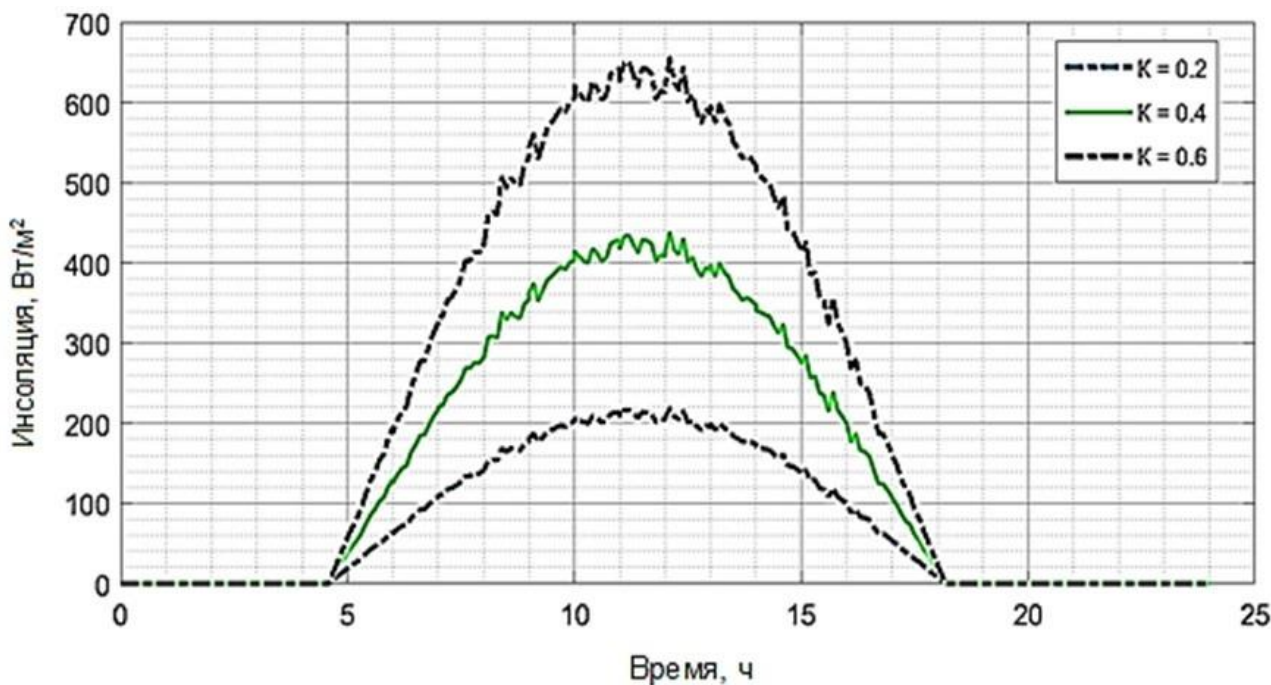


Рис. 5. Зависимость инсоляции от коэффициента прозрачности атмосферы
Fig. 5. Insolation vs atmospheric transparency factor

⁷ Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2019 год / отв. ред. Г. М. Черногаева. М.: Изд-во «Росгидромет», 2020. 247 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90/?year=2019&ID=90> (18.02.2022).

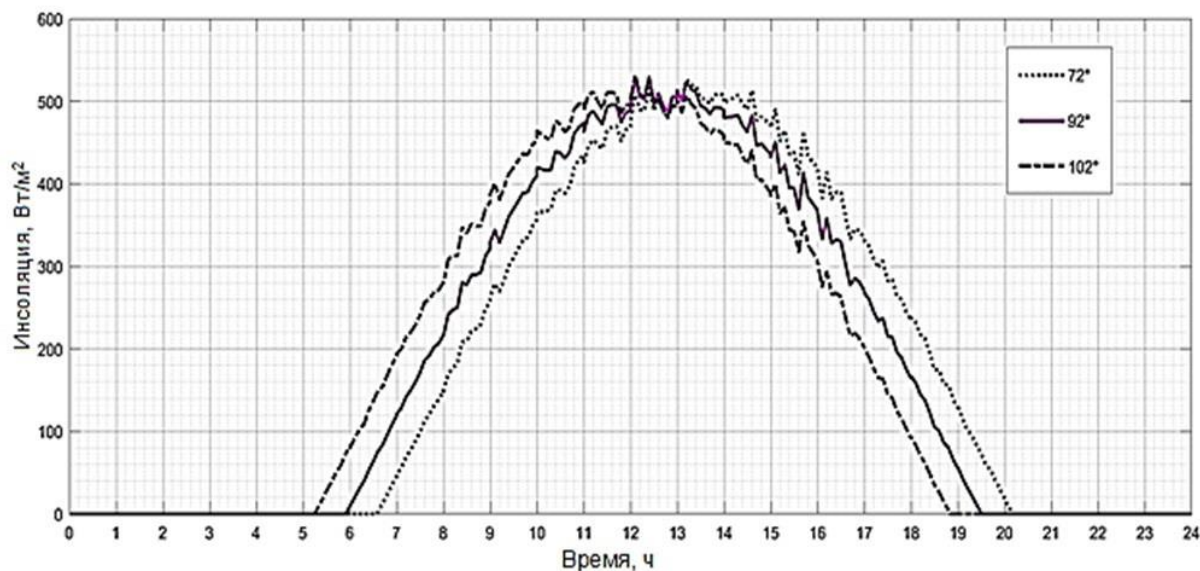


Рис. 6. График инсоляции в зависимости от долготы местности
Fig. 6. Insolation curve depending on the terrain longitude

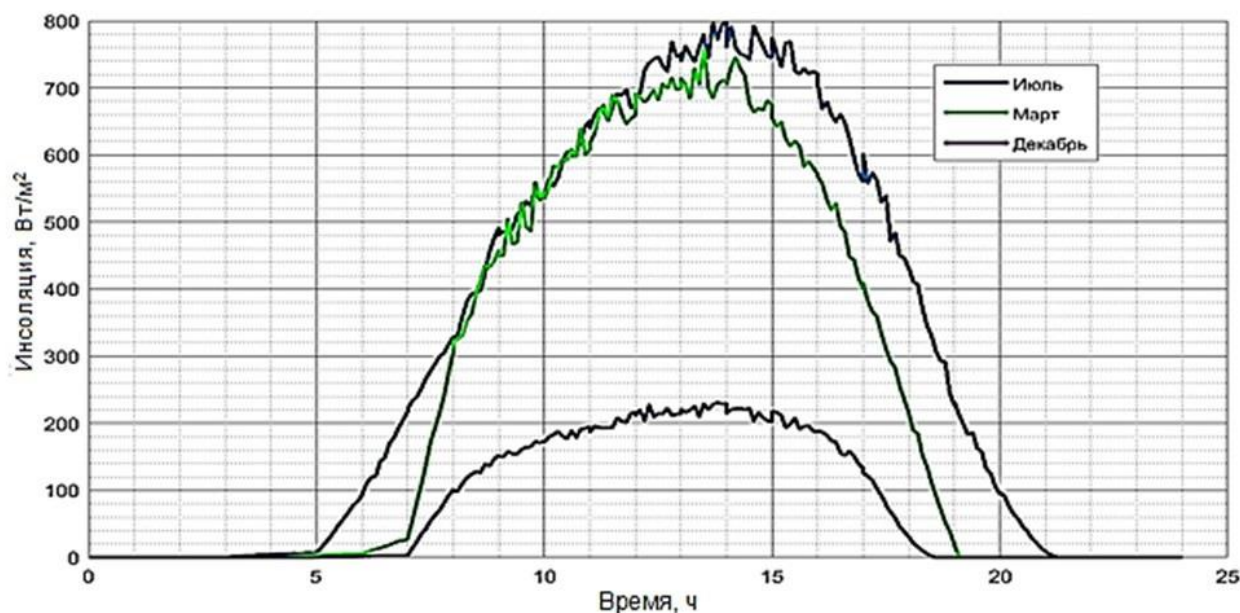


Рис. 7. Изменение графика инсоляции по разным месяцам
Fig. 7. Monthly variation of the insolation curve

Разработанная методика расчета инсоляции солнечной фотоэлектрической станции позволяет осуществлять цифровое моделирование режимов работы этих электростанций с учетом максимального количества значимых входных параметров. С учетом внедрения комплексного подхода в электроснабжении используют кроме традиционных СЭС другие ВИЭ, такие как солнечные фотоэлектрические станции, ветроустановки (ВУ), ди-

зель-электрические станции (ДЭС). Данная методика позволит осуществить выбор оптимального сочетания конфигурации СФЭС с различными источниками электроснабжения: традиционными СЭС, ВУ, ДЭС и малыми гидроэлектростанциями, в условиях неопределенности входных параметров (географических, погодных, температурных, экологических и др.).

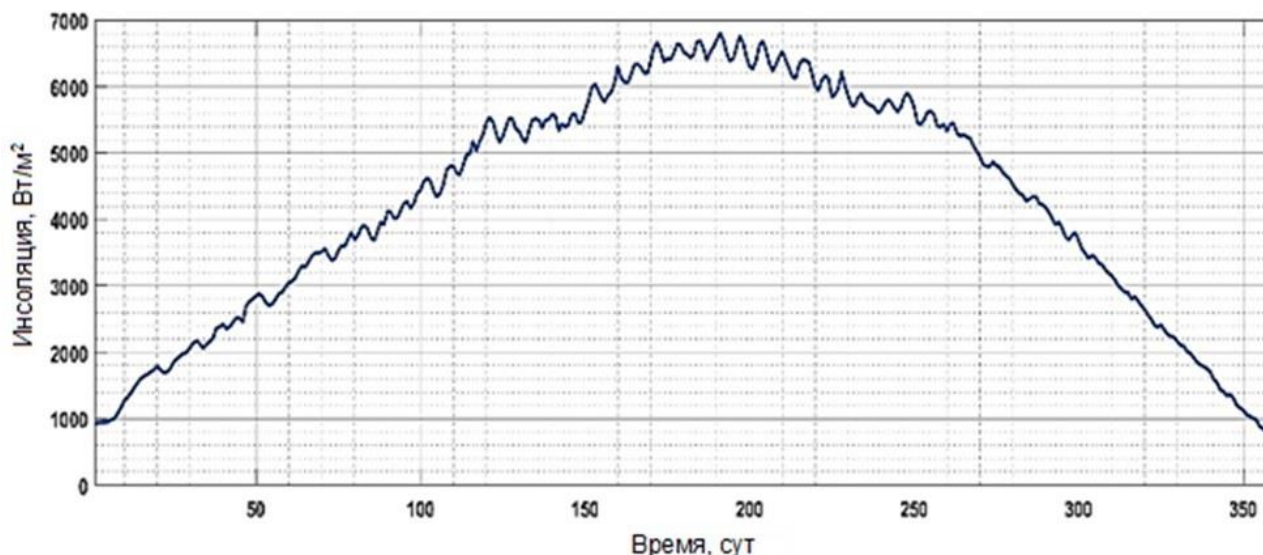


Рис. 8. Годовой график суммарной суточной инсоляции
Fig. 8. Annual curve of total daily insolation

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрены результаты расчетов инсоляции в среде MATLAB с применением расширения Simulink. Расчеты выполнены по методике, позволяющей по исходным данным (широта и долгота объекта, разница между местным официальным временем и средним временем по Гринвичу, угол наклона приемной солнечной панели, номер дня с начала года, коэффициент прозрачности атмосферы, альbedo и азимутальный угол), независимо от места установки и

наличия следящего трекера, проводить вычисление падающего потока инсоляции на произвольно ориентированную солнечную панель с учетом разной отражательной способности земной поверхности и поглощения солнечных лучей в атмосфере.

Программа расчета по данной методике может быть использована при проектировании и оптимизации систем энергоснабжения, организованных при применении солнечных фотозлектрических станций.

Список источников

1. Rylov A. V., Ilyushin P. V., Kulikov A. L., Suslov K. V. Testing photovoltaic power plants for participation in general primary frequency control under various topology and operating conditions // *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 16. P. 5179. <https://doi.org/10.3390/en14165179>.
2. Karamov D. N., Suslov K. V. Structural optimization of autonomous photovoltaic systems with storage battery replacements // *Energy Reports*. 2021. Vol. 7. P. 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.01.059>.
3. Suslov K., Solodusha S., Gerasimov D. Integral models for control of smart power networks // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. Vol. 49. Iss. 27. P. 439–444. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.772>.
4. Suslov K. V., Shushpanov I. N., Buryanina N. S., Ilyushin P. V. Flexible power distribution networks: new opportunities and applications // *Proceedings of the 9th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems - SMARTGREENS*. 2020. Vol. 1. P. 57–64. <https://doi.org/10.5220/0009393300570064>.
5. Шакиров В. А., Артемьев А. Ю. Учет данных метеостанций при анализе эффективности применения солнечных энергетических установок // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 3. С. 227–232.
6. Шакиров В. А., Артемьев А. Ю. Методика учета влияния облачности на поток солнечной радиации по данным архивов метеостанций // *Системы. Методы. Технологии*. 2014. № 4. С. 79–83.
7. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Korotkova K. E. Digital Twin of the distributed generation plant // *Actual problems of the energy complex: mining, production, transmission, processing and environmental protection. International Scientific and Practical Conference. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 976. P. 012024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/976/1/012024>.
8. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Arsentiev G. O. Intelligent electrical networks based on controlled energy routers // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2018.

<https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728738>.

9. Шайхутдинов А. М. Возможности использования облачных технологий в энергетике // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 2-3. [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/02/45646> (14.02.2022).
10. Глущенко П. В. Перспективы облачных технологий в математических и инструментальных методах исследования и управления в интеллектуальном электроэнергетическом комплексе экономики России. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-oblachnyh-tehnologiy-v-matematicheskikh-i-instrumentalnyh-metodah-issledovaniya-i-upravleniya-v-intellektualnom/viewer> (14.02.2022).
11. Nurbosynov D., Tabachnikova T., Bashirov R., Batanin A. Simulation model of the electrical complex of auxiliary equipment of an oil and gas production enterprise // International Scientific Electric Power Conference. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 643. P. 012096. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012096>.
12. Tabachnikova T., Makht A., Nurbosynov E. Analytical studies of transformers operating modes in supply and distribution electric network of a field substation // International Scientific Electric Power Conference. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 643. P. 012090. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012090>.
13. Obukhov S., Plotnikov I., Kryuchkova M. Simulation of Electrical Characteristics of a Solar Panel // 15th International Conference on Modern Technologies for Non-Destructive Testing. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2016. Vol. 132. Iss. 1. P. 012017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/132/1/012017>.
14. Lombardi P., Sokolnikova T., Suslov K., Voropai N., Styczynski Z. A. Isolated power system in Russia: a chance for renewable energies? // Renewable Energy. 2016. Vol. 90. P. 532–541. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.016>.
15. Luque A., Hegedus S. Handbook of photovoltaic science and engineering. Chichester: John Wiley & Sons, 2003. 1179 p. <https://doi.org/10.1002/0470014008>.
16. Markvart T., Castaner L. Practical handbook of photovoltaics. Fundamentals and applications. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. 1244 p.
17. Шакиров В. А., Артемьев А. Ю. Оценка ветроэнергетического потенциала района средствами компьютерного моделирования // Прикладная информатика. 2015. Т. 10. № 4. С. 93–104.
18. Liu B. Y. H., Jordan R. C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator // ASHRAE Journal. 1961. Vol. 3. P. 53–59.
19. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. 910 p.
20. Панкратьев П. С., Шакиров В. А. Методика определения перспективных электрических нагрузок удаленных электрических станций на основе кластерного анализа // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 68–71.
21. Еремеев В. С., Кирилин А. А., Шевченко М. А., Шувалов С. П., Струмеяк А. В., Булатов Ю. Н., Шакиров В. А. Электроснабжение удаленных потребителей в условиях Сибири с использованием энергии солнца // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 49–53.
22. Гусаров А. В. Основные закономерности соотношения русловой и бассейновой составляющих эрозии и стока взвешенных наносов в речных бассейнах Северной Евразии. Геоморфология. 2015. № 4. С. 3–20. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2015-4-3-20>.
23. Исаков С. В., Шкляев В. А. Оценка поступления солнечной радиации на естественные поверхности с применением геоинформационных систем // Географический вестник. 2012. № 1. С. 72–80. <https://doi.org/10.5220/0009393300570064>.

References

1. Rylov A. V., Ilyushin P. V., Kulikov A. L., Suslov K. V. Testing photovoltaic power plants for participation in general primary frequency control under various topology and operating conditions. *Energies*. 2021;14(16):5179. <https://doi.org/10.3390/en14165179>.
2. Karamov D. N., Suslov K. V. Structural optimization of autonomous photovoltaic systems with storage battery replacements. *Energy Reports*. 2021;7:349-358. <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2021.01.059>.
3. Suslov K., Solodusha S., Gerasimov D. Integral models for control of smart power networks. *IFAC-PapersOnLine*. 2016;49(27):439-444. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.772>.
4. Suslov K. V., Shushpanov I. N., Buryanina N. S., Ilyushin P. V. Flexible power distribution networks: new opportunities and applications. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems - SMARTGREENS*. 2020;1:57-64. <https://doi.org/10.5220/0009393300570064>.
5. Shakirov V. A., Artemiev A. Yu. Accounting weather station data in the analysis of solar power systems application efficiency. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;3:227-232. (In Russ.).
6. Shakirov V. A., Artemyev A. Y. Technique for considering the influence of cloudiness on the solar radiation flux according to the archives of meteorological stations. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*. 2014;4:79-83. (In Russ.).
7. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Korotkova K. E. Digital twin of the distributed generation plant. In: *Actual problems of the energy complex: mining, production, transmission, processing and environmental protection. International Scientific and Practical Conference. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;976:012024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/976/1/012024>.

899X/976/1/012024.

8. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Arsentiev G. O. Intelligent electrical networks based on controlled energy routers. In: *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728738>.

9. Shaikhutdinov A. M. The possibility of using cloud technologies in energy sector. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii = Modern scientific researches and innovations*. 2015;2-3. Available from: <http://web.snauka.ru/issues/2015/02/45646> [Accessed 14th February 2022]. (In Russ.).

10. Glushchenko P. V. Prospects of cloud technologies in mathematical and instrumental methods of study and management of intellectual power complex of the Russian economy. 2020. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-oblachnyh-tehnologiy-v-matematicheskikh-i-instrumentalnyh-metodah-issledovaniya-i-upravleniya-v-intellektualnom/viewer> [Accessed 14th February 2022].

11. Nurbosynov D., Tabachnikova T., Bashirov R., Batanin A. Simulation model of the electrical complex of auxiliary equipment of an oil and gas production enterprise. In: *International Scientific Electric Power Conference. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;643:012096. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012096>.

12. Tabachnikova T., Makht A., Nurbosynov E. Analytical studies of transformers operating modes in supply and distribution electric network of a field substation. In: *International Scientific Electric Power Conference. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;643:012090. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012090>.

13. Obukhov S., Plotnikov I., Kryuchkova M. Simulation of electrical characteristics of a solar panel. In: *15th International Conference on Modern Technologies for Non-Destructive Testing. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;132(1):012017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/132/1/012017>.

14. Lombardi P., Sokolnikova T., Suslov K., Voropai N., Styczynski Z. A. Isolated power system in Russia: a chance for renewable energies? *Renewable Energy*. 2016;90:532-541.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.016>.

15. Luque A., Hegedus S. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Chichester: John Wiley & Sons; 2003, 1179 p. <https://doi.org/10.1002/0470014008>.

16. Markvart T., Castaner L. *Practical handbook of photovoltaics. Fundamentals and applications*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2012, 1244 p.

17. Shakirov V. A., Artem'ev A. Yu. Computer simulation in solving the problem of estimating the wind power potential of the region. *Prikladnaya informatika = Journal of Applied Informatics*. 2015;10(4):93-104. (In Russ.).

18. Liu B. Y. H., Jordan R. C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator. *ASHRAE Journal*. 1961;3:53-59.

19. Duffie J. A., Beckman W. A. *Solar engineering of thermal processes*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons; 2013, 910 p.

20. Pankratiev P. S., Shakirov V. A. Cluster analysis-based methodology for determining the promising electrical loads of remote power plants. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2014;1:68-71. (In Russ.).

21. Ereemeev V. S., Kirilin A. A., Shevchenko M. A., Shvalov S. P., Strumelyak A. V., Bulatov Yu. N., Shakirov V. A. Power supply of remote consumers in Siberian conditions using solar energy. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2014;1:49-53. (In Russ.).

22. Gusarov A. V. The main regularities of the ratio between riverbed and basin components of erosion and suspended sediment flux in the Northern Eurasia's river basins. *Geomorfologiya*. 2015;(4):3-20. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2015-4-3-20>.

23. Isakov S. V., Shklyayev V. A. Estimation of receipt of solar radiation on natural surfaces with application of geoinformation systems. *Geograficheskii vestnik*. 2012;1:72-80. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коновалов Юрий Васильевич,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электропривода и электрического транспорта,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Хазиев Алексей Нурисламович,

студент,
Ангарский государственный технический университет,
665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuri V. Konovalev,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Electric Drive and Electric Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Aleksey N. Khaziev,

Student,
Angarsk State Technical University,
60 Tchaikovsky St., Angarsk 665835, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.12.2021; одобрена после рецензирования 28.03.2022; принята к публикации 15.08.2022.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 01.12.2021; approved after reviewing 28.03.2022; accepted for publication 15.08.2022.



Научная статья
УДК 620.92:519.816
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-451-464>

Многокритериальный выбор структуры генерирующих мощностей локальных энергосистем на основе модифицированного метода анализа иерархий

Александр Сергеевич Нефедов^{1✉}, Владислав Альбертович Шакиров²,
Светлана Михайловна Игнатьева³

^{1,3}Братский государственный университет, г. Братск, Россия

²Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

¹domino1991@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5507-2798>

²mynovember@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8629-9549>

³Smignateva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5179-1680>

Резюме. Цель – представить модификацию метода анализа иерархий для повышения его эффективности при использовании в задачах многокритериального сравнения структур генерирующих мощностей локальных энергорайонов при их развитии. В работе рассматривается многокритериальная задача выбора наиболее перспективного соотношения установленных мощностей электростанций, входящих в состав единой структуры генерирующих мощностей при развитии локального энергорайона Хабаровского края. В роли энергоисточников выступают тепловая, солнечная, ветровая и дизельная электростанции. В качестве критериев оценки альтернативных вариантов были приняты следующие: нормированная стоимость электроэнергии, оценка экологической эффективности; оценка общественного мнения о последствиях, связанных со строительством электростанций. Для решения многокритериальной задачи предложено использовать метод анализа иерархий. При рассмотрении применения оригинального метода анализа иерархий для решения поставленной задачи установлено, что реализация этапа парных сравнений альтернатив при их большом количестве представляет ощутимую нагрузку на лицо, принимающее решение. Так, уже при оценке 10 альтернатив по 5 критериям лицу, принимающему решение, необходимо провести 225 парных сравнений, что в итоге может дать неприемлемый индекс согласованности результатов. Кроме этого, необходима процедура, направленная на учет неопределенности предпочтений лица, принимающего решение. В качестве решения предложена методика заполнения матриц парных сравнений альтернатив по критериям, которая заключается в построении интервальной или нечеткой модели предпочтений лица, принимающего решение, в отношении пар оценок по критерию. В качестве апробации предложенной методики приводится численный пример решения поставленной задачи. Получен наилучший вариант энергоструктуры, состоящей из электростанций: тепловой – 30 МВт, солнечной – 35 МВт, дизельной – 39 МВт. Предложенная методика обеспечивает высокую согласованность результатов парных сравнений альтернатив. Кроме этого, использование модифицированного метода анализа иерархий позволяет учитывать нелинейный характер предпочтений лица, принимающего решение, относительно оценок альтернатив по критериям.

Ключевые слова: изолированная энергосистема, структура генерирующих мощностей, метод анализа иерархий, матрица парных сравнений, модель предпочтений

Благодарности: Исследование выполнено в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0004, рег. № АААА-А21-121012090010-7) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (проект № 13.ЦКП.21.0038).

Для цитирования: Нефедов А. С., Шакиров В. А., Игнатьева С. М. Многокритериальный выбор структуры генерирующих мощностей локальных энергосистем на основе модифицированного метода анализа иерархий // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 451–464. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-451-464>.

ENERGY INDUSTRY

Original article

Multi-criteria selection of the mix of generating plants in local energy systems based on a modified analytic hierarchy process

Aleksandr S. Nefedov^{1✉}, Vladislav A. Shakirov², Svetlana M. Ignatieva³^{1,3}Bratsk State University, Bratsk, Russia²Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia¹domino1991@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5507-2798>²mynovember@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8629-9549>³Smignateva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5179-1680>

Abstract. This paper presents a modification of the analytic hierarchy process in order to increase its efficiency for a multi-criteria comparison of mixes of generating plants in local energy areas during their development. The multi-criteria problem of selecting the most effective ratio of rated capacities is considered for power plants representing a single mix of generating plants during the development of a local energy area in the Khabarovsk Krai. The energy sources are represented by thermal, solar, wind and diesel power plants. The following estimation criteria for alternative solutions were accepted: leveled cost of electricity, ecological efficiency estimation; estimation of public opinion about the consequences involved with the establishment of power plants. In order to solve the multi-criteria problem, the analytic hierarchy process (AHP) was used. When using the original AHP for the set problem, a large quantity of alternatives at the stage of pairwise comparisons were found to represent a perceptible load on a decision maker. Thus, already during the estimation of 10 alternatives according to 5 criteria, decision makers should conduct 225 pairwise comparisons, which may eventually result in an unacceptable consistency of the results. In addition, this requires a procedure accounting for the uncertainty of the decision maker's preferences. The proposed solution represents a method of forming matrices of pairwise comparisons upon criteria. This method consists in generating an interval or fuzzy model of the decision maker's preferences for evaluating pairs of estimates according to the criterion. The proposed method was verified using a numerical example of solving the set problem. The obtained optimum mix of power plants consists of thermal, solar and diesel plants with a power of 30, 35 and 39 mW, respectively. The proposed method ensures a high consistency of the results obtained during alternative pairwise comparisons. In addition, the modified analytic hierarchy process takes into account the non-linear nature of the decision maker's preferences for estimating alternatives according to criteria.

Keywords: isolated power grid, generating capacity structure, analytic hierarchy process, pairwise comparison matrix, preference model

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the project of the state assignment (No. FWEU-2021-0004, reg. no. AAAA-A21-121012090010-7) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation for the period from 2021 to 2030 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (project no. 13.ЦКП.21.0038).

For citation: Nefedov A. S., Shakirov V. A., Ignatieva S. M. Multi-criteria selection of the mix of generating plants in local energy systems based on a modified analytic hierarchy process. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):451-464. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-451-464>.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно энергетической стратегии России, на период до 2035 г. повышение устойчивости и надежности энергоснабжения макрорегионов будет осуществляться с максимальным экономически эффективным использованием местных энергетических ресурсов, возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и распределенной генерации⁴. Большая роль отводится ВИЭ и местным энергоресурсам в решении задач освоения удаленных и изолированных районов [1, 2].

Одной из ключевых задач при развитии

локальных энергосистем в удаленных районах является определение перспективной структуры генерирующих мощностей (СГМ) – состава и установленной мощности электростанций. Эта задача усложнена как большим числом возможных альтернатив, так и высокой неопределенностью условий дальнейшего развития удаленного района.

В зарубежных исследованиях при решении задач планирования развития энергетики районов и регионов широкое распространение получили методы многокритериального выбора, такие как метод анализа иерархий

АНР (от англ. Analytic Hierarchy Process) [3], ELECTRE, метод многокритериальной теории полезности MAUT (от англ. Multy Attribute Utility Theory), PROMETHEE, TOPSIS, UTA (от англ. Utilities Additives) и др. Для многокритериального выбора СГМ во многих исследованиях использовался АНР [4]. В исследованиях [5] АНР применялся для многокритериального сравнения последствий реализации сценариев с переходом к различным СГМ в перспективе до 2050 г. с позиций экономических, экологических, технических и социальных критериев. В работе [6] с помощью АНР выполнено многокритериальное сравнение различных структур локальных энергосистем с ВИЭ, формирование которых проводилось в программе HOMER. В исследовании [7] с помощью АНР осуществлялась многокритериальная оценка различных вариантов электроснабжения удаленных районов с рассмотрением в качестве альтернатив дизельной генерации и различных видов ВИЭ.

Широкому использованию АНР способствовала его реализация в виде программного обеспечения [7, 8], а также следующие достоинства [9]:

- универсальность метода, простота расчетов рейтингов альтернатив, удобство парных сравнений для выявления предпочтений лица, принимающего решения (ЛПР);

- возможность обобщения мнений нескольких экспертов, работающих независимо друг от друга над локальными задачами [9];

- возможность сравнения альтернатив как с качественным, так и с количественным описанием оценок по критериям;

- широкие возможности выявления противоречий в предпочтениях ЛПР с помощью процедуры определения индекса согласованности суждений.

Недостатки и ограничения АНР [10]:

- проблема согласованности суждений, а также увеличение трудоемкости метода в задачах с количеством критериев или альтернатив более семи;

- проблема Rank reversal – изменение ранжирования альтернатив при добавлении или удалении новых;

- проблема учета неопределенности исходной информации и предпочтений ЛПР.

Для преодоления ограничений классического АНР исследователями были представлены различные модификации метода или теоретические обоснования допустимости указанных недостатков [11]. Так, был предложен мультипликативный метод анализа иерархий, который не имеет проблемы rank reversal в подавляющем большинстве случаев [12]. Также были предложены подходы к снижению числа запросов к ЛПР [13]. В зарубежных исследованиях получили распространение модификации нечеткого АНР, позволяющего учесть неопределенность исходной информации и предпочтений [14–16].

В работе [17] авторами была предложена модификация метода АНР, направленная на снижение числа запросов при проведении парных сравнений альтернатив по критериям. Такая модификация обеспечивает возможность применения АНР к задачам с большим числом альтернатив. В данной статье предлагается дальнейшее развитие этой модификации АНР в направлении возможности учета неопределенностью предпочтений ЛПР.

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ КЛАССИЧЕСКОГО МЕТОДА ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

Суть метода анализа иерархий состоит в диалоговой работе с ЛПР, в ходе которой многокритериальная задача представляется в виде иерархической структуры цель–критерии–альтернативы. На следующем этапе при помощи ЛПР проводится реализация парных сравнений альтернатив и критериев с использованием шкалы сравнительной важности (табл. 1)⁵.

В результате попарного сравнения альтернатив по критериям формируются матрицы парных сравнений с оценками $C_{11} \dots C_{mm}$

⁴Об Энергетической стратегии РФ на период до 2030 г. (документ утратил силу). Распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009. № 1715-р.

⁵Петровский А. Б. Теория принятия решений: учеб. для студ. высш. учеб. заведений. М.: ИЦ «Академия», 2009. 400 с.

Таблица 1. Фундаментальная шкала для оценки силы суждений⁵
Table 1. Fundamental assessment scale for judgment strength⁵

Степень важности	Оценка сравнительной важности элемента иерархии
Равная важность	1
Умеренное превосходство	3
Существенное превосходство	5
Большое превосходство	7
Абсолютное превосходство	9

(табл. 2)⁵. Аналогично формируется матрица парных сравнений критериев. Данные матрицы являются обратно симметричными.

Таблица 2. Матрица парных сравнений альтернатив⁵
Table 2. Pairwise comparison matrix of alternatives⁵

Альтернатива	A ₁	...	A _j	...	A _m
A ₁	1	...	c _{1j}	...	c _{1m}
...
A _i	c _{i1}	...	c _{ij}	...	c _{im}
...
A _m	c _{m1}	...	c _{mj}	...	1

Далее осуществляется свертка локальных приоритетов⁵:

$$v_i = d_i / \sum_{i=1}^m d_i, \quad (1)$$

где d_i – элемент собственного вектора матрицы, соответствующий критерию или альтернативе.

Элемент собственного вектора матрицы, например, парных сравнений альтернатив⁵:

$$d_i = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m c_{ij}}, \quad (2)$$

где m – количество альтернатив; c_{ij} – оценка пары альтернатив i и j .

На заключительном этапе определяется глобальный приоритет для каждой альтернативы:

$$V_j = \sum_{i=1}^n w_i v_{ij}, \quad (3)$$

где V_j – показатель важности j -й альтернативы; n – количество критериев; w_i – вес i -го критерия; v_{ij} – вес j -й альтернативы по i -му критерию.

Альтернатива с максимальным глобальным приоритетом считается лучшим решением.

Процедура АНР располагает встроенным критерием проверки качества заполнения матриц парных сравнений – индексом согласованности, который дает информацию о степени нарушения согласованности экспертных суждений и определяется как⁵

$$I_h = \frac{\lambda_h^{\max} - h}{h - 1}, \quad (4)$$

где λ_h^{\max} – собственный вектор матрицы; h – размерность матрицы парных сравнений.

Индекс согласованности сравнивается с индексом средней согласованности I_h^{cp} , значения которого приведены в табл. 3.

$$R_h = \frac{I_h}{I_h^{cp}}. \quad (5)$$

Таблица 3. Индекс средней согласованности для случайных матриц разного порядка

Table 3. Average consistency index for random matrices of different order

h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_h^{cp}	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Если $R_h \leq 0,1 \div 0,15$ (10÷15%), то уровень согласованности является приемлемым, в противном случае необходимо вернуться к опросу ЛПР и скорректировать элементы матриц парных сравнений.

Количество запросов к ЛПР при парных сравнениях альтернатив и критериев определяется зависимостью:

$$Q = \left(\frac{m^2}{2} - \frac{m}{2} \right) \cdot n. \quad (6)$$

Исходя из данной зависимости, уже при многокритериальном выборе из 10 альтернатив с учетом 5 критериев ЛПР необходимо

будет провести 225 парных сравнений, что достаточно трудоемко и может зачастую дать неприемлемый индекс согласованности. Поэтому для возможности применения АНР к задачам с большим числом альтернатив и критериев в статье [17] была предложена модификация метода. На этапе парных сравнений альтернатив предложена диалоговая процедура, направленная на построение модели предпочтений ЛПР, которая далее замещает ЛПР. В задачах с большим горизонтом планирования ЛПР затруднительно точно выражать свои предпочтения. Поэтому предлагается дальнейшее развитие предложенной в [17] модификации АНР, направленное на формирование интервальной или нечеткой модели предпочтений.

МЕТОДИКА ЗАПОЛНЕНИЯ МАТРИЦ ПАРНЫХ СРАВНЕНИЙ АЛЬТЕРНАТИВ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ЛИЦА, ПРИНИМАЮЩЕГО РЕШЕНИЯ

Данная методика базируется на исследовании, проведенном авторами в работе [17].

В основе предлагаемой модификации метода АНР лежит методика, направленная на построение интервальной или нечеткой «модели предпочтений ЛПР в отношении пар оценок по критериям». Модель учитывает различную ценность для ЛПР оценок по критериям в начале и конце их диапазона. Рассмотрим основные этапы предлагаемой методики.

Предположим, что альтернативы оценены по какому-либо критерию и диапазон оценок варьируется от x_a до x_b . Цель диалоговой процедуры – заполнить матрицу парных сравнений (см. табл. 2), элемент которой определяется как [17]

$$c(x_i, x_j) = \frac{s(x_i)}{s(x_j)}, \quad (7)$$

где $s(x_i)$, $s(x_j)$ – соответственно, показатель сравнительной важности оценки x_i и x_j в отношении x_a [17].

Шаг 1: формируется модель предпочтений ЛПР на основе шкалы (см. табл. 1) и следующих вопросов:

Оценки альтернатив по критерию изменяются от x_a до x_b [17]. При этом оценка x_b превосходит оценку x_a с оценкой 9 по шкале (см. табл. 1). Пусть имеется альтернатива с оценкой x_a . Какая оценка альтернативы в интервале $[x'_{aL}; x'_{aR}]$ могла бы соответствовать оценке 3 по шкале (см. табл. 1) «умеренное превосходство» по отношению к x_a ? Ответ ЛПР формирует интервал $[\Delta x_{1L}^3; \Delta x_{1R}^3] = [x'_{aL}; x'_{aR}] - x_a$. Ответ ЛПР может быть представлен и в виде нечеткой треугольной оценки $[x'_{aL}; x'_{aC}; x'_{aR}]$, где x'_{aC} – наиболее вероятное значение.

Пусть имеется альтернатива с оценкой x_b . Назовите оценку в интервале $[x'_{bL}; x'_{bR}]$, по отношению к которой оценка x_b могла бы характеризоваться оценкой «3»? Ответ ЛПР определяет $[\Delta x_{2L}^3; \Delta x_{2R}^3] = [x'_{bL}; x'_{bR}] - x_a$. Вторым вопросом позволяет проверить корректность суждений ЛПР относительно шкалы сравнительной важности (см. табл. 1) [17]. Если $[x'_{aL}; x'_{aR}]$ в сравнении с x_a дает оценку «3» по шкале (см. табл. 1), то x_b при сравнении с $[x'_{aL}; x'_{aR}]$ должна также давать «3», так как x_b в сравнении с x_a дает оценку «9» (см. табл. 1). Если имеется разница между $[\Delta x_{1L}^3; \Delta x_{1R}^3]$ и $[\Delta x_{2L}^3; \Delta x_{2R}^3]$, это означает, что ЛПР неточно выражает свои предпочтения. Ошибка суждений определяется в виде разности между $[\Delta x_{1L}^3; \Delta x_{1R}^3]$ и $[\Delta x_{2L}^3; \Delta x_{2R}^3]$. После определения предпочтений ЛПР относительно оценки «3» дальнейшая процедура заполнения матриц парных сравнений осуществляется без участия ЛПР.

Шаг 2: Заполнение матрицы парных сравнений альтернатив по критерию. Интервальные предпочтения, соответствующие оценкам «5», «7», «9» (см. табл. 1) определяются при помощи системы уравнений:

$$\begin{cases} x^1 = x_a \\ x_{L,R}^3 = x^1 + \Delta x_{L,R}^3 \\ x_{L,R}^5 = x_{L,R}^3 + \Delta x_{L,R}^3 t \\ x_{L,R}^7 = x_{L,R}^5 + \Delta x_{L,R}^3 t^2 \\ x^9 = x_{L,R}^7 + \Delta x_{L,R}^3 t^3 = x_b \end{cases}, \quad (8)$$

где $x_{L,R}$ – определяемые предпочтения ЛПР относительно оценок сравнительной важности

сти (см. табл. 1), соответствующие нижней L и верхней R границам интервальных предпочтений ЛПР.

В результате может быть получена модель предпочтений ЛПР относительно изменения оценок альтернатив по критерию. На рис. 1 представлена модель предпочтений ЛПР, построенная на основе ответов ЛПР в виде нечетких треугольных чисел.

Шаг 3. По зависимости (см. рис. 1.) для любой альтернативы с оценкой x_i можно

определить оценки сравнительной важности $s_L(x_i)$, $s_C(x_i)$, $s_R(x_i)$, и при помощи формулы (7) заполнить матрицу парных сравнений, которая будет выглядеть следующим образом (табл. 4).

Шаг 4: После реализации парных сравнений при помощи методики оригинального АНР можно определить 3 набора локальных коэффициентов важности альтернатив по критериям (табл. 5).

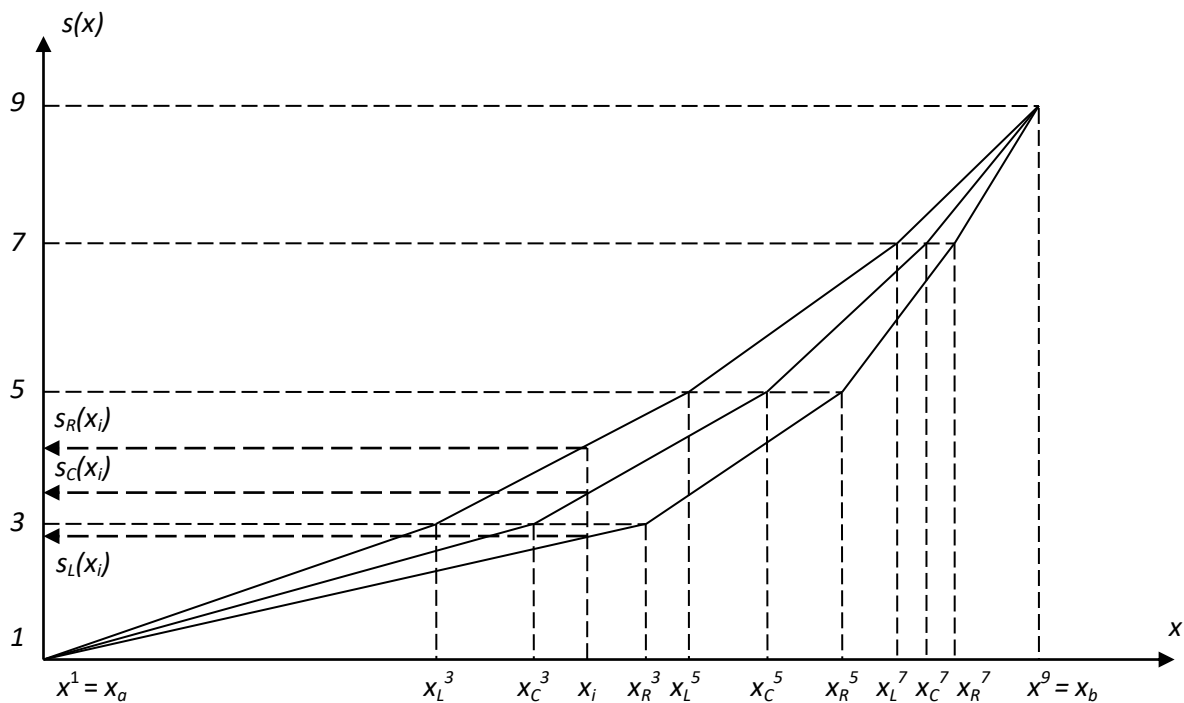


Рис. 1. Зависимость оценок сравнительной важности для нижней, средней и верхней границ ответа лица, принимающего решение, при возрастающих предпочтениях
Fig. 1. Dependence of comparative importance estimates for the lower, middle and upper boundaries of the decision maker's response under increasing preferences

Таблица 4. Матрица парных сравнений альтернатив по критерию при нечетких предпочтениях лица, принимающего решения

Table 4. Pairwise comparison matrix of alternatives by the criterion with fuzzy preferences of the decision maker

Альтернатива	A_1	A_2	...	A_m
A_1	1	$s_L(x_1)/s_L(x_2)$ $c_{12} = s_C(x_1)/s_C(x_2)$ $s_R(x_1)/s_R(x_2)$...	$s_L(x_1)/s_L(x_m)$ $c_{1m} = s_C(x_1)/s_C(x_m)$ $s_R(x_1)/s_R(x_m)$
A_2	$s_L(x_2)/s_L(x_1)$ $c_{21} = s_C(x_2)/s_C(x_1)$ $s_R(x_2)/s_R(x_1)$	1	...	$s_L(x_2)/s_L(x_m)$ $c_{2m} = s_C(x_2)/s_C(x_m)$ $s_R(x_2)/s_R(x_m)$
...	1	...
A_m	$s_L(x_m)/s_L(x_1)$ $c_{m1} = s_C(x_m)/s_C(x_1)$ $s_R(x_m)/s_R(x_1)$	$s_L(x_m)/s_L(x_2)$ $c_{m2} = s_C(x_m)/s_C(x_2)$ $s_R(x_m)/s_R(x_2)$...	1

Таблица 5. Набор локальных коэффициентов важности альтернатив для n критериев при неопределенности предпочтений лица, принимающего решения

Table 5. A set of local coefficients of alternative importance for n criteria with uncertainty of the decision maker's preferences

Критерий	Локальные коэффициенты важности для m альтернатив		
	левая граница	среднее значение	правая граница
K_1	$V_{1L} = \{V_{11L}, V_{12L}, \dots, V_{1mL}\}$	$= \{V_{11C}, V_{12C}, \dots, V_{1mC}\}$	$V_{1R} = \{V_{11R}, V_{12R}, \dots, V_{1mR}\}$
K_2	$V_{2L} = \{V_{21L}, V_{22L}, \dots, V_{2mL}\}$	$V_{2C} = \{V_{21C}, V_{22C}, \dots, V_{2mC}\}$	$V_{2R} = \{V_{21R}, V_{22R}, \dots, V_{2mR}\}$
...
K_n	$V_{nL} = \{V_{n1L}, V_{n2L}, \dots, V_{nmL}\}$	$V_{nC} = \{V_{n1C}, V_{n2C}, \dots, V_{nmC}\}$	$V_{nR} = \{V_{n1R}, V_{n2R}, \dots, V_{nmR}\}$

На основе наборов локальных коэффициентов важности (см. табл. 5) может быть получен набор итоговых глобальных приоритетов для каждой из альтернатив, который имеет вид (табл. 6).

$$V_{iR} = \max(V_{ik}), k = 1 \dots z. \quad (12)$$

Полученные оценки для каждой альтернативы позволяют установить возможные их отклонения в связи с неопределенностью предпочтений ЛПР.

Таблица 6. Набор глобальных приоритетов альтернативы x_i

Table 6. A set of global priorities for x_i alternative

Вариант предпочтений	Глобальные приоритеты альтернативы x_i
1	$V_{i1} = V_{i1L}W_1 + V_{i2L}W_2 + \dots + V_{inL}W_n$
2	$V_{i2} = V_{i1L}W_1 + V_{i2L}W_2 + \dots + V_{inL}W_n$
3	$V_{i3} = V_{i1L}W_1 + V_{i2L}W_2 + \dots + V_{inL}W_n$
...	...
z	$V_{iz} = V_{i1R}W_1 + V_{i2R}W_2 + \dots + V_{inR}W_n$

Каждый вариант предпочтений ЛПР z определяет соответствующее ранжирование альтернатив. Лучшей признается альтернатива, которая имеет высший ранг при большем числе вариантов предпочтений ЛПР:

$$P_i = \frac{z_i}{z}, \quad (9)$$

где z_i – число вариантов предпочтений, при котором альтернатива i имела высший ранг.

Также могут быть получены средние и граничные многокритериальные оценки альтернатив с учетом всех вариантов предпочтений ЛПР:

$$V_{iC} = \frac{\sum_{k=1}^z V_{ik}}{z}; \quad (10)$$

$$V_{iL} = \min(V_{ik}), k = 1 \dots z; \quad (11)$$

АПРОБАЦИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ANALYTIC HIERARCHY PROCESS ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ВЫБОРА СТРУКТУРЫ ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ В УДАЛЕННОМ РАЙОНЕ

Применение методики заполнения матриц парных сравнений альтернатив предлагается рассмотреть на примере задачи многокритериального выбора СГМ в удаленном районе. Рассматриваются следующие виды электростанций в рамках СГМ: тепловая электростанция (ТЭС), солнечная электростанция (СЭС), ветровая электростанция (ВЭС), дизельная электростанция (ДЭС). Каждая из электростанций, входящих в СГМ, имеет свои преимущества и недостатки, поэтому перед специалистами возникает задача, целью которой является выбор наиболее рационального соотношения генерирующих мощностей электростанций, входящих в единую СГМ с позиций многих критериев [18, 19].

Оценка различных вариантов СГМ проводится с использованием следующих критериев:

- K_1 – нормированная стоимость электроэнергии за период эксплуатации СГМ сроком 25 лет, руб/кВт·ч;
- K_2 – оценка экологической эффективности СГМ в ходе жизненного цикла, балл;
- K_3 – оценка общественного мнения о последствиях, связанных со строительством

электростанций, входящих в СГМ, балл.

Наиболее высокие значения оценок СГМ по критериям K_1 и K_2 соответствуют менее предпочтительным вариантам, а по критерию K_3 – более предпочтительным.

Исходные данные об оценках альтернатив предлагается принять на основе исследований развития удаленного района Хабаровского края [20], которые имеют следующие показатели (табл. 7).

Итак, предположим, что ЛПР после ознакомления с оценками СГМ по критериям (при реализации диалоговой процедуры выявления предпочтений) руководствовался следующими положениями:

– по критерию K_1 «Нормированная стоимость электроэнергии» важной для ЛПР является граница 8 руб/кВт·ч. Превышение этой границы повышает риски неэффективного функционирования электростанций, входящих в СГМ;

– по критерию K_2 «Экологическая эффективность» для ЛПР превышение 40 баллов соответствует вариантам с чрезмерным влиянием на экологию района размещения электростанций, входящих в СГМ;

– по критерию K_3 предпочтения для ЛПР имеют линейный характер.

Рассмотрим процесс формирования предпочтений ЛПР:

Критерий K_1 : оценки альтернатив изменя-

ются от 5,8 до 12,7 руб/кВт·ч. Пусть имеется альтернатива с оценкой 12,7 руб/кВт·ч. Какая оценка альтернативы даст «умеренное превосходство с оценкой 3» (см. табл. 1) по отношению к оценке 12,7 руб/кВт·ч? Ответ ЛПР: [11,7; 11,95; 12,2] руб/кВт·ч.

Критерий K_2 : оценки альтернатив изменяются от 32,2 до 52,6 балла. Пусть имеется альтернатива с оценкой 52,6 балла. Какая оценка альтернативы даст «умеренное превосходство с оценкой 3» (см. табл. 1) по отношению к оценке 52,6 балла? Ответ: [50; 50,5; 51] балл.

Предпочтения ЛПР относительно критерия K_3 имеют линейный характер.

В результате ответов формируется модель предпочтений ЛПР (табл. 8, рис. 2).

На основе полученных зависимостей становится возможным заполнить матрицы парных сравнений при помощи формул (7) и (8). В табл. 9 представлен пример для критерия K_1 – «Нормированная стоимость электроэнергии». Заполнение матриц парных сравнений осуществляется автоматически без участия ЛПР. Процедура обеспечивает идеальную согласованность с оценкой $R_h = 0$.

На основе заполненных аналогичным образом матриц парных сравнений для остальных критериев при помощи формулы (1) был получен набор локальных приоритетов альтернатив (табл. 10).

Таблица 7. Оценки альтернативных вариантов структуры генерирующих мощностей по критериям

Table 7. Estimates of alternative variants of the generating capacity structure by criteria

Альтернатива	Установленная мощность, МВт				K_1 , руб/кВт·ч	K_2 , балл	K_3 , балл
	ТЭС	СЭС	ВЭС	ДЭС			
A_1	40	20	0	29	5,84	52,64	1,45
A_2	30	35	0	39	7,75	45,81	1,78
A_3	30	0	70	39	8,56	50,32	1,34
A_4	30	30	30	39	7,97	47,40	1,71
A_5	20	45	0	49	9,73	39,05	2,06
A_6	20	0	70	49	10,66	42,35	1,56
A_7	20	30	30	49	10,08	40,25	1,91
A_8	10	60	0	59	11,64	32,22	2,38
A_9	10	0	70	59	12,76	34,37	1,78
A_{10}	10	30	30	59	12,17	33,11	2,11

Примечания: ТЭС – тепловая электростанция; СЭС – солнечная электростанция; ВЭС – ветровая электростанция; ДЭС – дизельная электростанция.

Таблица 8. Предпочтения лица, принимающего решения, относительно критериев
 Table 8. Decision maker's preferences regarding the criteria

Границы предпочтений лица, принимающего решения	Критерии		
	K_1 , руб/кВт·ч	K_2 , балл	K_3 , балл
Δx_L^3	0,5	1,5	0,26
Δx_C^3	0,75	2	
Δx_R^3	1	2,5	

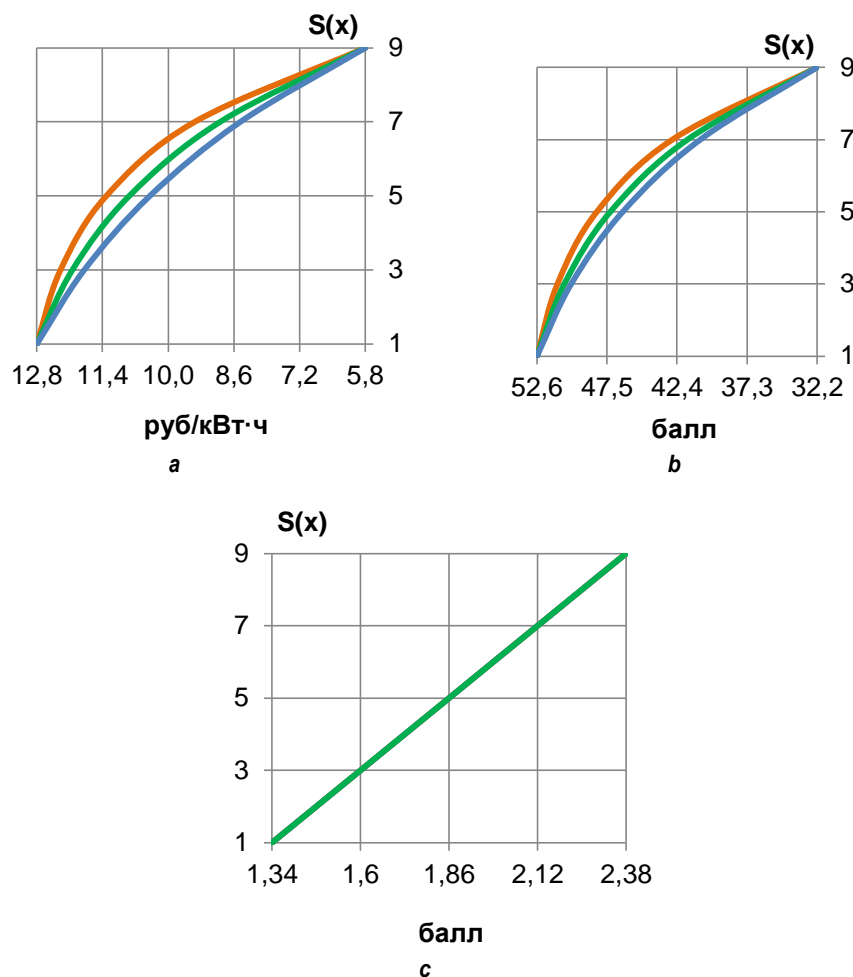


Рис. 2. Зависимости оценок сравнительной важности от оценок альтернатив по критериям: а – «Нормированная стоимость электроэнергии»; б – «Экологическая эффективность»; с – «Оценка общественного мнения»
 Fig. 2. Dependences of the estimates of comparative importance on alternative assessments by criteria:
 а – “Levelized cost of electrical energy”; б – “Environmental efficiency”; с – “Public opinion assessment”

Оценка сравнительной важности критериев проводится по оригинальной методике АНР на основе формул (1) и (2). В табл. 11 представлена матрица парных сравнений критериев и полученные локальные приоритеты критериев. I_h матрицы парных сравнений составил 0,0011, а отношение согласованности R_h составило 0,18%, что является приемлемым результатом.

На основе локальных приоритетов (см.

табл. 10, 11) формируется набор итоговых ранжировок альтернатив $LLL - RRR$, где L, C, R соответствуют левой, средней и правой границам локальных приоритетов альтернатив по критериям V_L, V_C, V_R , используемых для определения глобальных приоритетов альтернатив (табл. 12). Показатели для 5 наиболее эффективных альтернатив представлены в табл. 12.

Таблица 9. Матрица парных сравнений альтернатив по критерию K_1
Table 9. Pairwise comparison matrix of alternatives by the K_1 criterion

K_1	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}
A_1	1	1,13 1,16 1,19	1,20 1,25 1,30	1,15 1,18 1,22	1,35 1,47 1,59	1,59 1,75 1,96	1,43 1,56 1,69	2,11 2,49 2,84	9,00 9,00 9,00	2,83 3,52 4,15
A_2	0,88 0,86 0,84	1	1,06 1,07 1,09	1,02 1,02 1,02	1,19 1,26 1,33	1,40 1,50 1,65	1,26 1,34 1,42	1,86 2,15 2,38	7,93 7,75 7,54	2,50 3,03 3,48
A_3	0,83 0,80 0,77	0,94 0,93 0,91	1	0,96 0,95 0,94	1,12 1,18 1,22	1,32 1,40 1,51	1,19 1,25 1,30	1,75 2,00 2,18	7,48 7,22 6,90	2,36 2,82 3,18
A_4	0,87 0,84 0,82	0,98 0,98 0,98	1,04 1,05 1,07	1	1,17 1,24 1,30	1,38 1,48 1,61	1,24 1,32 1,39	1,83 2,11 2,33	7,81 7,60 7,38	2,46 2,97 3,40
A_5	0,74 0,68 0,63	0,84 0,79 0,75	0,89 0,85 0,82	0,85 0,81 0,77	1	1,18 1,19 1,24	1,06 1,06 1,07	1,56 1,70 1,79	6,68 6,13 5,68	2,10 2,39 2,62
A_6	0,63 0,57 0,51	0,72 0,67 0,61	0,76 0,71 0,66	0,73 0,68 0,62	0,85 0,84 0,81	1	0,90 0,89 0,86	1,33 1,43 1,45	5,68 5,15 4,59	1,79 2,01 2,11
A_7	0,70 0,64 0,59	0,79 0,74 0,70	0,84 0,80 0,77	0,81 0,76 0,72	0,94 0,94 0,94	1,11 1,12 1,16	1	1,47 1,60 1,68	6,31 5,76 5,31	1,99 2,25 2,45
A_8	0,47 0,40 0,35	0,54 0,47 0,42	0,57 0,50 0,46	0,55 0,47 0,43	0,64 0,59 0,56	0,75 0,70 0,69	0,68 0,63 0,60	1	4,27 3,61 3,17	1,35 1,41 1,46
A_9	0,11 0,11 0,11	0,13 0,13 0,13	0,13 0,14 0,14	0,13 0,13 0,14	0,15 0,16 0,18	0,18 0,19 0,22	0,16 0,17 0,19	0,23 0,28 0,32	1	0,31 0,39 0,46
A_{10}	0,35 0,28 0,24	0,40 0,33 0,29	0,42 0,35 0,31	0,41 0,34 0,29	0,48 0,42 0,38	0,56 0,50 0,47	0,50 0,44 0,41	0,74 0,71 0,69	3,18 2,56 2,17	1

Таблица 10. Набор локальных приоритетов альтернатив по критериям
Table 10. A set of local priorities of alternatives by criteria

Альтернатива	K_1			K_2			K_3
	v_L	v_C	v_R	v_L	v_C	v_R	v
A_1	0,152	0,161	0,171	0,016	0,016	0,016	0,040
A_2	0,134	0,139	0,143	0,091	0,088	0,086	0,095
A_3	0,126	0,129	0,131	0,055	0,051	0,047	0,022
A_4	0,132	0,136	0,140	0,082	0,079	0,073	0,084
A_5	0,113	0,110	0,108	0,120	0,121	0,122	0,142
A_6	0,096	0,092	0,087	0,110	0,108	0,106	0,059
A_7	0,106	0,103	0,101	0,116	0,117	0,117	0,117
A_8	0,072	0,065	0,060	0,140	0,144	0,148	0,196
A_9	0,017	0,018	0,019	0,133	0,136	0,140	0,095
A_{10}	0,054	0,046	0,041	0,137	0,141	0,145	0,151

Таблица 11. Предпочтения лица, принимающего решения, относительно критериев
Table 11. Decision maker's preferences regarding criteria

Критерий	K_1	K_2	K_3	Коэффициенты важности
K_1	1,00	5,00	2,08	0,595
K_2	0,20	1,00	0,42	0,119
K_3	0,48	2,40	1,00	0,286

Таблица 12. Набор глобальных приоритетов альтернатив
 Table 12. A set of global priorities of alternatives

Альтернатива	LLL	LLC	LLR	LCL	LRL	LRR	LRC	LCR	LCC
A ₂	0,118	0,118	0,118	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117
A ₄	0,112	0,112	0,112	0,112	0,111	0,111	0,111	0,112	0,112
A ₅	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122
A ₇	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111
A ₈	0,115	0,115	0,115	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116
№ победившей	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	CCC	CCL	CCR	CLC	CRC	CRR	CRL	CLR	CLL
A ₂	0,12041	0,12041	0,12041	0,12079	0,12010	0,12010	0,12010	0,12079	0,12079
A ₄	0,11440	0,11440	0,11440	0,11484	0,11376	0,11376	0,11376	0,11484	0,11484
A ₅	0,12034	0,12034	0,12034	0,12020	0,12047	0,12047	0,12047	0,12020	0,12020
A ₇	0,10884	0,10884	0,10884	0,10877	0,10890	0,10890	0,10890	0,10877	0,10877
A ₈	0,11153	0,11153	0,11153	0,11104	0,11206	0,11206	0,11206	0,11104	0,11104
№ победившей	2	2	2	2	5	5	5	2	2
	RRR	RRC	RRL	RCR	RLR	RLL	RLC	RCL	RCC
A ₂	0,123	0,123	0,123	0,123	0,106	0,123	0,123	0,123	0,123
A ₄	0,116	0,116	0,116	0,117	0,102	0,117	0,117	0,117	0,117
A ₅	0,119	0,119	0,119	0,119	0,093	0,119	0,119	0,119	0,119
A ₇	0,107	0,107	0,107	0,107	0,088	0,107	0,107	0,107	0,107
A ₈	0,109	0,109	0,109	0,109	0,070	0,108	0,108	0,109	0,109
№ победившей	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Таблица 13. Многокритериальные оценки альтернатив с учетом неопределенности предпочтений лица, принимающего решения
 Table 13. Multi-criteria assessments of alternatives taking into account the uncertainty of decision makers' preferences

Альтернатива	P_i	V_{iL}	V_{iC}	V_{iR}
A ₂	0,555	0,106	0,1145	0,123
A ₄	0	0,102	0,1095	0,117
A ₅	0,444	0,093	0,1075	0,122
A ₇	0	0,088	0,0995	0,111
A ₈	0	0,07	0,093	0,116

Результаты оценки альтернатив по формулам (9)–(12) представлены в табл. 13.

Из табл. 12, 13 можно сделать вывод, что лучшей является альтернатива A₂. При этом альтернативы A₄ и A₅ также могут быть эффективными, их необходимо оставить для более детального рассмотрения на последующих этапах исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен метод АНР с точки зрения его применения к задачам с большим количеством альтернатив и критериев, приведены достоинства и недостатки оригинального метода.

Предложена методика выявления предпочтений ЛПР при заполнении матриц парных сравнений альтернатив по критериям, которая позволяет снизить число запросов к ЛПР при высокой согласованности результатов. Важной особенностью методики является

возможность выражать предпочтения ЛПР относительно оценок альтернатив по критериям в интервальном или нечетком виде. Такая модификация оригинального метода имеет большое значение для решения задач с большим горизонтом планирования, где существует высокая неопределенность предпочтений ЛПР.

Предложен подход для ранжирования альтернатив по многокритериальным оценкам, полученным на основе интервальных или нечетких ответов от ЛПР.

Представлен пример выбора структуры генерирующих мощностей с использованием модифицированного метода АНР и построением нечеткой модели предпочтений ЛПР.

Предложенная диалоговая процедура по выявлению предпочтений ЛПР и построению матриц парных сравнений альтернатив по критериям может быть реализована в виде программы для ЭВМ.

Список источников

1. Саати Т. Л., Керис К. П. Аналитическое планирование. Организация систем / пер. с англ. И. А. Ушакова. М.: Изд-во «Радио и связь», 1991. 244 с.
2. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. М.: Изд-во «Радио и связь», 1993. 278 с.
3. Marinakis V., Doukas H., Xidonas P., Zopounidis C. Multicriteria decision support in local energy planning: an evaluation of alternative scenarios for the sustainable energy action plan // *Omega*. 2017. Vol. 69. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.07.005>.
4. Oree V., Sayed Hassen S. Z., Fleming P. J. Generation expansion planning optimisation with renewable energy integration: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 69. P. 790–803. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.120>.
5. Malkawi S., Al-Nimr M., Azizi D. A multi-criteria optimization analysis for Jordan's energy mix // *Energy*. 2017. Vol. 127. P. 680–696. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.015>.
6. Lombardi P., Sokolnikova T., Suslov K., Voropai N., Styczynski Z. A. Isolated power system in Russia: a chance for renewable energies? // *Renewable Energy*. 2016. Vol. 90. P. 532–541. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.016>.
7. Ossadnik W., Kaspar R. Evaluation of AHP software from a management accounting perspective // *Journal of Modelling in Management*. 2013. Vol. 8. Iss. 3. P. 305–319. <https://doi.org/10.1108/JM2-01-2011-0007>.
8. Сологубова Л. А., Кулаков А. А., Байбекова Ф. Н., Трунькина О. В., Беспалова Н. М. Программная реализация принятия решений с помощью метода анализа иерархий // *iPolytech Journal*. 2018. Т. 22. № 11. С. 145–158. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-145-158>.
9. Ishizaka A., Labib A. Analytic hierarchy process and expert choice: benefits and limitations // *OR Insight*. 2009. Vol. 22. Iss. 4. P. 201–220. <https://doi.org/10.1057/ori.2009.10>.
10. Подиновский В. В., Подиновская О. В. Ещё раз о некорректности метода анализа иерархий // *Проблемы управления*. 2012. № 4. С. 75–78.
11. Dede G., Kamalakis T., Spichopoulos T. Theoretical estimation of the probability of weight rank reversal in pairwise comparisons // *European Journal of Operational Research*. 2016. Vol. 252. Iss. 2. P. 587–600. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.01.059>.
12. Majumdar A., Tiwari M. K., Agarwal A., Prajapat K. A new case of rank reversal in analytic hierarchy process due to aggregation of cost and benefit criteria // *Operations Research Perspectives*. 2021. Vol. 8. P. 100185. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2021.100185>.
13. Noghin V. D. A simplified variant of the analytic hierarchy process based on a nonlinear scalarizing function // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2004. Vol. 44. Iss. 7. P. 1194–1202.
14. Alam K. A., Ahmed R., Butt F. S., Kim Soon-Gohn, Ko Kwang-Man. An uncertainty-aware integrated fuzzy AHP-WASPAS model to evaluate public cloud computing services // *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 130. P. 504–509. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.068>.
15. Zhu Guo-Niu, Hu Jie, Ren Hongliang. A fuzzy rough number-based AHP-TOPSIS for design concept evaluation under uncertain environments // *Applied Soft Computing*. 2020. Vol. 91. P. 106228. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106228>.
16. Dogan O. Process mining technology selection with spherical fuzzy AHP and sensitivity analysis // *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol. 178. P. 114999. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114999>.
17. Нефедов А. С., Шакиров В. А. Автоматизация процедуры заполнения матриц парных сравнений альтернатив по критериям при использовании метода анализа иерархий // *Информационные технологии*. 2019. Т. 25. № 6. С. 331–339. <https://doi.org/10.17587/it.25.331-339>.
18. Khan I. Power generation expansion plan and sustainability in a developing country: a multi-criteria decision analysis // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 220. P. 707–720. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.161>.
19. Ullah Z., Elkadeem M. R., Kotb K. M., Taha I. B. M., Wang Shaorong. Multi-criteria decision-making model for optimal planning of on/off grid hybrid solar, wind, hydro, biomass clean electricity supply // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 179. P. 885–910. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.063>.
20. Нефедов А. С., Яковкина Т. Н. Многокритериальный выбор мощности электростанций на основе возобновляемых источников энергии и местных видов топлива в составе локальной энергосистемы // *iPolytech Journal*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1255–1270. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1255-1270>.

References

1. Saaty T. L., Kearns K. P. Analytical planning. The organization of systems, 1995, 208 p. (Russ. ed.: *Analiticheskoe planirovanie. Organizacija sistem*. Moscow, Radio i svyaz'; 1991, 244 p.)
2. Saati. T. Analytic hierarchy process, 1991, 278 p. (Russ. ed.: *Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarhij*. Moscow, Radio i svyaz'; 1991, 278 p.)
3. Marinakis V., Doukas H., Xidonas P., Zopounidis C. Multicriteria decision support in local energy planning: an evaluation of alternative scenarios for the sustainable energy action plan. *Omega*. 2017;69:1-16. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.07.005>.
4. Oree V., Sayed Hassen S. Z., Fleming P. J. Generation expansion planning optimisation with renewable energy integration: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;69:790-803. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.120>.
5. Malkawi S., Al-Nimr M., Azizi D. A multi-criteria optimi-

zation analysis for Jordan's energy mix. *Energy*. 2017;127:680-696.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.015>.

6. Lombardi P., Sokolnikova T., Suslov K., Voropai N., Styczynski Z. A. Isolated power system in Russia: a chance for renewable energies? *Renewable Energy*. 2016;90:532-541.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.016>.

7. Ossadnik W., Kaspar R. Evaluation of AHP software from a management accounting perspective. *Journal of Modelling in Management*. 2013;8(3):305-319.
<https://doi.org/10.1108/JM2-01-2011-0007>.

8. Sologubova L. A., Kulakov A. A., Baibekova F. N., Trun'kina O. V., Bespalova N. M. Decision-making software implementation using hierarchy analysis method. *iPolytech Journal*. 2018;22:145-158. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-145-158>.

9. Ishizaka A., Labib A. Analytic hierarchy process and expert choice: benefits and limitations. *OR Insight*. 2009;22(4):201-220. <https://doi.org/10.1057/ori.2009.10>.

10. Podinovskij V. V., Podinovskaya O. V. Once again on the incorrectness of the hierarchy analysis method. *Problemy upravleniya = Control Sciences*. 2012;4:75-78. (In Russ.).

11. Dede G., Kamalakis T., Sphicopoulos T. Theoretical estimation of the probability of weight rank reversal in pairwise comparisons. *European Journal of Operational Research*. 2016;252(2):587-600.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.01.059>.

12. Majumdar A., Tiwari M. K., Agarwal A., Prajapat K. A new case of rank reversal in analytic hierarchy process due to aggregation of cost and benefit criteria. *Operations Research Perspectives*. 2021;8:100185.
<https://doi.org/10.1016/j.orp.2021.100185>.

13. Noghin V. D. A simplified variant of the analytic hierarchy process based on a nonlinear scalarizing function.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нефедов Александр Сергеевич,
старший преподаватель кафедры энергетики,
Братский государственный университет,
665709, Россия, г. Братск, ул. Макаренко, 40

Шакиров Владислав Альбертович,
кандидат технических наук, доцент ВАК,
старший научный сотрудник
Лаборатории энергоснабжения децентрализованных потребителей,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130

Игнатьева Светлана Михайловна,
кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры энергетики,
Братский государственный университет,
665709, Россия, г. Братск, ул. Макаренко, 40

Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2004;44(7):1194-1202.

14. Alam K. A., Ahmed R., Butt F. S., Kim Soon-Gohn, Ko Kwang-Man. An uncertainty-aware integrated fuzzy AHP-WASPAS model to evaluate public cloud computing services. *Procedia Computer Science*. 2018;130:504-509.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.068>.

15. Zhu Guo-Niu, Hu Jie, Ren Hongliang. A fuzzy rough number-based AHP-TOPSIS for design concept evaluation under uncertain environments. *Applied Soft Computing*. 2020;91:106228.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106228>.

16. Dogan O. Process mining technology selection with spherical fuzzy AHP and sensitivity analysis. *Expert Systems with Applications*. 2021;178:114999.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114999>.

17. Nefedov A. S., Shakirov V. A. Automation of the procedure for filling matrices of pairwise comparison of alternatives by criteria when using the analytic hierarchy process. *Informacionnye tekhnologii*. 2019;25(6):331-339.
<https://doi.org/10.17587/it.25.331-339>. (In Russ.).

18. Khan I. Power generation expansion plan and sustainability in a developing country: a multi-criteria decision analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2019;220:707-720. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.161>.

19. Ullah Z., Elkadeem M. R., Kotb K. M., Taha I. B. M., Wang Shaorong. Multi-criteria decision-making model for optimal planning of on/off grid hybrid solar, wind, hydro, biomass clean electricity supply. *Renewable Energy*. 2021;179:885-910.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.063>.

20. Nefedov A. S., Yakovkina T. N. Multi-criterial choice of capacity of power plants based on renewable energy sources and local fuels within local energy system. *iPolytech Journal*. 2020;24(6):1255-1270. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1255-1270>.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr S. Nefedov,
Senior Lecturer of the Energy Department,
Bratsk State University,
40, Makarenko St., Bratsk 665709, Russia

Vladislav A. Shakirov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Senior Researcher of the Laboratory of Energy Supply of Off-Grid Consumers,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Svetlana M. Ignatieva,
Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor,
Associate Professor of the Energy Department,
Bratsk State University,
40, Makarenko St., Bratsk 665709, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.03.2022; одобрена после рецензирования 28.04.2022; принята к публикации 04.08.2022.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 06.03.2022; approved after reviewing 28.04.2022; accepted for publication 04.08.2022.



Научная статья
УДК: 621.311.001
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-465-486>

Исследование функционирования алгоритма синтетической инерции в электроэнергетических системах разной плотности

Владимир Евгеньевич Рудник^{1✉}, Алексей Александрович Суворов²,
Николай Юрьевич Рубан³, Михаил Владимирович Андреев⁴,
Юлий Дмитриевич Бай⁵

¹⁻⁵Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

¹ver3@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6181-2497>

²suvorovaa@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3896-3921>

³rubanny@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1396-9104>

⁴andreevmv@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6420-4374>

⁵nodius@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9928-408X>

Резюме. Цель – повышение эффективности функционирования фотоэлектрической установки в электрических сетях разной плотности, в частности корректная настройка алгоритма синтетической инерции и контура фазовой автоподстройки частоты. Объектом исследования является система автоматического управления фотоэлектрической станцией. В исследованиях использовались методы гибридного моделирования с помощью всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем. Установлено, что возможность использования алгоритма синтетической инерции и его корректная настройка являются одним из важнейших свойств фотоэлектрических установок, подключаемых к сети с помощью силового преобразователя. Показано, что для эффективной работы данного алгоритма важным является правильное определение полосы пропускания фазовой автоподстройки частоты. Функционирование контура данной фазовой автоподстройки частоты может приводить к колебаниям с различной частотой при установке фотоэлектрических установок в слабых электрических сетях (электрические сети с коэффициентом короткого замыкания менее 10 о.е.) и, соответственно, негативно сказаться на работоспособности алгоритма синтетической инерции. Также установлено, что в сильной сети с увеличением полосы пропускания блока фазовой автоподстройки частоты уменьшается величина снижения частоты сети (оптимальная полоса пропускания 50 Гц), в слабой же сети, наоборот: блок фазовой автоподстройки частоты с увеличением полосы пропускания уменьшает скорость реакции алгоритма синтетической инерции, что приводит к увеличению величины снижения частоты (оптимальная полоса пропускания 0,3 Гц). Таким образом, проведенные исследования показали, что контур фазовой автоподстройки частоты в системе управления фотоэлектрической установки позволяет влиять на функционирование алгоритма синтетической инерции, но характер этого влияния зависит от плотности электрической сети и может быть положительным или отрицательным. Полученное на тестовой энергосистеме влияние также подтверждено для энергосистемы реальной размерности.

Ключевые слова: фазовая автоподстройка частоты, синтетическая инерция, фотоэлектрическая установка, возобновляемые источники энергии, электроэнергетическая система

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Госзадание «Наука» № FSWW-2020-0017.

Для цитирования: Рудник В. Е., Суворов А. А., Рубан Н. Ю., Андреев М. В., Бай Ю. Д. Исследование функционирования алгоритма синтетической инерции в электроэнергетических системах разной плотности // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 465–486. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-465-486>.

Original article

Operation of synthetic inertia units in electric power systems of various densities

Vladimir E. Rudnik^{1✉}, Aleksey A. Suvorov², Nikolai Yu. Ruban³, Mikhail V. Andreev⁴, Yuly D. Bay⁵

¹⁻⁵National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

¹ver3@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6181-2497>

²suvorovaa@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3896-3921>

³rubanny@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1396-9104>

⁴andreevmv@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6420-4374>

⁵nodius@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9928-408X>

Abstract. This study is aimed at improving the efficiency of photovoltaic plants operated in the electric networks of various densities by adjusting the synthetic inertia algorithm and automatic frequency control circuits. To this end, the automatic control system of a photovoltaic plant was investigated using hybrid modelling methods in an all-mode online simulation complex of electric power systems. It was shown that the stability of photovoltaic power plants could be improved through the use of synthetic inertia. According to the conducted research, effective operation of this algorithm can be ensured by a correct determination of the bandwidth of automatic frequency control. Operation of this automatic frequency control circuit can lead to the oscillations of various frequencies during the installation of photovoltaic power plants in low-current electrical networks (electrical networks with the short circuit coefficient of less than 10 a.u.) and, subsequently, negatively affect the operability of the synthetic inertia algorithm. In addition, in high-current networks with an increased bandwidth of the automatic frequency control unit, the value of the network frequency reduction decreases (optimal bandwidth of 50 Hz). Conversely, in low-current networks, the automatic frequency control unit, under an increase in the bandwidth, decreases the response rate of the synthetic inertia algorithm, which leads to an increase in the frequency reduction value (optimal bandwidth of 0.3 Hz). Thus, the conducted investigations showed that the automatic frequency control circuit in the control system of a photovoltaic power plant can be used to alter the operation of the synthetic inertia algorithm. However, the nature of this effect depends on the electrical network density and can be both positive and negative. The effect observed in the tested power system was confirmed for a real-dimension power system.

Keywords: phase-locked loop frequency control, synthetic inertia, photovoltaic installation, renewable energy sources, electric power system

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment 'Science' no. FSWW-2020-0017.

For citation: Rudnik V. E., Suvorov A. A., Ruban N. Yu., Andreev M. V., Bay Yu. D. Operation of synthetic inertia units in electric power systems of various densities. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):465-486. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-465-486>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается тенденция непрерывно растущего энергопотребления. Многие ведущие страны заинтересованы в декарбонизации, основанной на сокращении традиционной генерации на базе ископаемого топлива. Одним из фундаментальных направлений развития мировой энергетики является широкомасштабное внедрение новых объектов генерации на ба-

зе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1]. В соответствии с отчетом Международного энергетического агентства⁶, прирост установленной мощности ВИЭ в 2020 г. составил 280 ГВт, что больше почти на 45% по сравнению с 2019 г., рекордный рост был также обусловлен увеличением на 23% новых фотоэлектрических установок почти на 135 ГВт мощности.

Общим для объектов ВИЭ является ис-

⁶Renewable Energy Market Update. Outlook for 2021 and 2022 [Электронный ресурс]. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/18a6041d-bf13-4667-a4c2-8fc008974008/RenewableEnergyMarketUpdate-Outlookfor2021and2022.pdf> (27.02.2022).

пользование силовых преобразователей (СП) для подключения к сети, что приводит к отсутствию прямого сопряжения с сетью и, соответственно, вкладу в общую инерцию системы. Обозначенные особенности устройств на базе силовой полупроводниковой техники существенно изменяют динамические свойства электроэнергетических систем (ЭЭС) ввиду отличающейся динамики функционирования СП, особенно его системы автоматического управления (САУ) по сравнению с традиционным оборудованием ЭЭС. В результате непрерывный рост уровня внедрения объектов ВИЭ, который продлится как минимум до 2030 г., согласно Парижскому соглашению⁷, приводит к значительному снижению надежности функционирования современных ЭЭС в нормальных и особенно аварийных режимах⁸ [2–7]. Одной из основных проблем является обеспечение устойчивости ЭЭС по частоте⁹ [8, 9]. Возникновение данной проблемы связано с внедрением безынерционных объектов ВИЭ, в том числе путем замены традиционной генерации, что приводит к снижению доступного резерва мощности и общей инерции системы. Это создает увеличение скорости изменения частоты напряжения при возникновении небаланса мощности [10]. В итоге в энергосистемах с низкой инерцией глубина снижения частоты гораздо больше при аналогичном возмущении по сравнению с традиционными ЭЭС [11, 12].

Для обеспечения надежного функционирования ЭЭС с низкой инерцией и снижения негативных последствий от внедрения объектов ВИЭ необходима адаптация их САУ под требования, предъявляемые к традиционной генерации в составе ЭЭС [13]. Благодаря необходимой массовости использования алгоритмов регулирования частоты, раз-

рабатываемые решения должны быть простыми и надежными. В настоящее время разработано множество подходов, направленных на решение данной проблемы и обеспечивающих формирование так называемой синтетической инерции. Одним из таких подходов, который применим для всех доминирующих видов ВИЭ, является внедрение в САУ блока синтетической инерции (СИ), а также корректная настройка блока фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [14–16]. Контур ФАПЧ обычно используется для измерения частоты сети, благодаря своей простой структуре и надежности, блок ФАПЧ является наиболее популярным и широко используемым [17].

Кроме этого, при функционировании объектов ВИЭ необходимо учитывать неоднородность величины инерции, которая приводит к разным скоростям изменения и соответственно величинам снижения частоты в разных частях сети, что вызывает серьезные трудности при настройке систем защиты от снижения и повышения частоты. Отдельно стоит выделить проблему моделирования переходных процессов в «слабых» сетях при внедрении ВИЭ. Ввиду более колебательно-го характера переходных процессов в таких сетях, довольно часто складывается ситуация, что после возмущений начинаются колебания с нарастающей амплитудой, а также блок ФАПЧ требует более точной настройки, в отличие от сетей с «сильными» связями [16]. В данной работе [16, 18] показано, что коэффициенты блока ФАПЧ, особенно в сетях со «слабыми» связями, сильно влияют на работу силового преобразователя.

Данная статья посвящена рассмотрению этого вопроса и организована следующим образом. Сначала описаны рассматриваемый алгоритм СИ с особенностями его при-

⁷OECD Factbook 2015-2016. Economic, Environmental and Social Statistics. 2016. 228 p. <https://doi.org/10.1787/factbook-2015-en> (25.02.2022).

⁸National Grid, Voltage and Frequency Dependency. National Grid, 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nationalgrid.com/sites/default/files/documents/SOFReport-Fr%equencyandVoltageassessment.pdf> (27.02.2022).

⁹JWG C2/C4.41: Impact of High Penetration of Inverter-based Generation on System Inertia of Networks. 2020. [Электронный ресурс]. URL: http://cigre.ru/research_commitets/ik_rus/c2_rus/materials/library/WBN022%20-%20C2.C4.41%20-%20Dec20.pdf (27.02.2022).

менения и режим «недогрузки» фотоэлектрической установки (ФЭУ). Далее представлена используемая математическая модель объекта ФЭУ и тестовая схема ЭЭС. В финальном разделе представлены результаты экспериментов с соответствующим описанием. В заключении представлены выводы по выполненным исследованиям.

ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ БЛОКА СИНТЕТИЧЕСКОЙ ИНЕРЦИИ И РЕЖИМА «НЕДОГРУЗКИ» ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Одним из основных подходов к формированию синтетической инерции является использование СИ. Реализация СИ, как правило, рассматривается применительно к ветро-

энергетическим установкам (ВЭУ) [8, 15, 19–21]. Это связано с возможностью использования накопленной энергии вращающегося ветроколеса для краткосрочного увеличения выдаваемой ВЭУ мощности во время возникновения просадки по частоте в ЭЭС. При этом есть 2 варианта реализации алгоритма синтетической инерции: одно- и двухконтурная схема управления (рис. 1). Двухконтурная схема имеет очевидное преимущество перед одноконтурной [22], поскольку реагирует не только в процессе изменения частоты, но и при фактическом отклонении частоты от заданной величины, обеспечивая тем самым возврат после возникновения небаланса к более высокому уровню частоты. Далее будет рассмотрена двухконтурная схема.

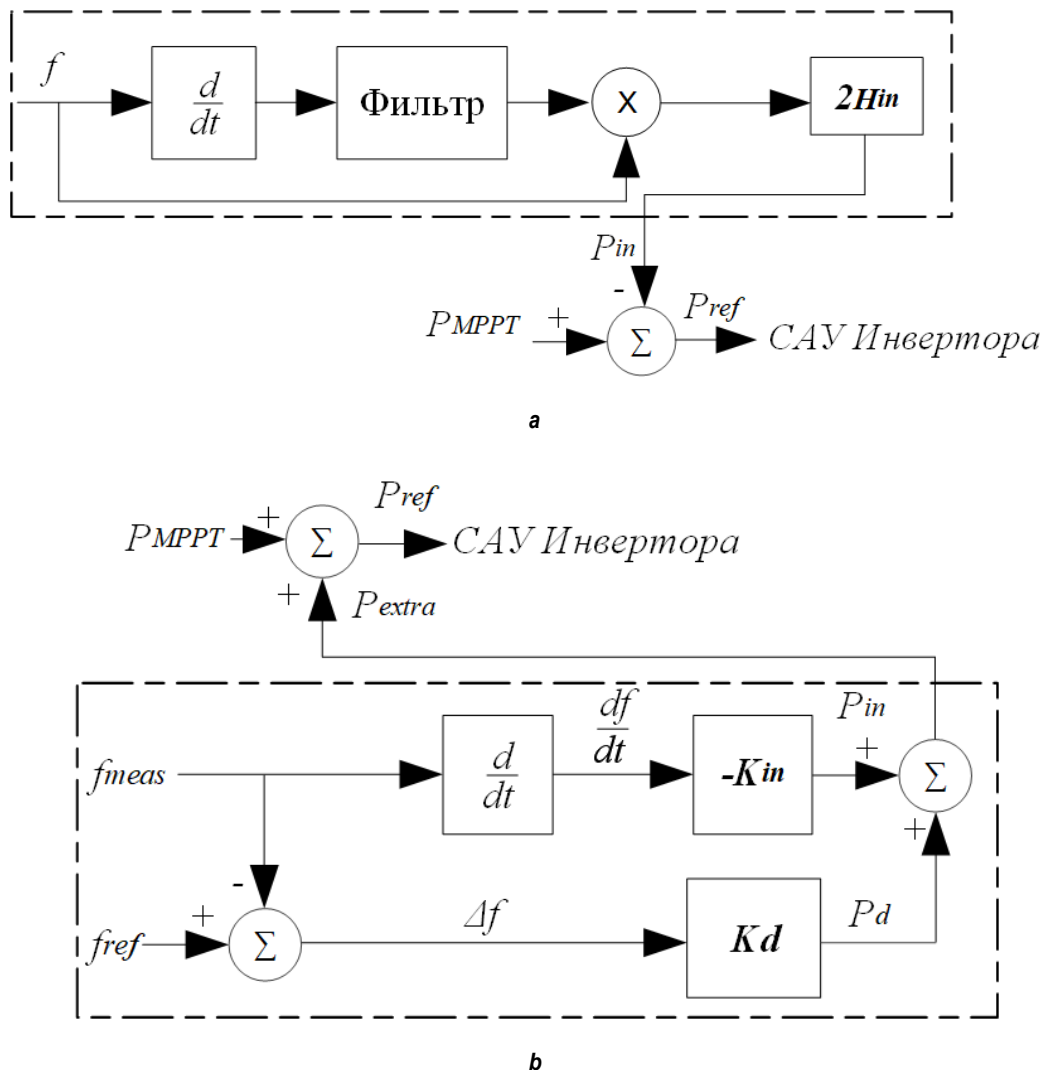


Рис. 1. Схема блока синтетической инерции: а – одноконтурное управление; б – двухконтурное управление

Fig. 1. Schematic diagram of a synthetic inertia unit: a – single-loop control; b – double-loop control

Двухконтурная схема работает следующим образом: при возникновении колебаний частоты в энергосистеме, в системе управления выдаваемой мощностью установки ВЭУ к уставке активной мощности добавляется сигнал P_{extra} частотного отклика. Данный сигнал формируется двухконтурной схемой управления, включающей контур контроля производной частоты df/dt и контур отклонения частоты Δf . При этом вклад в формирование P_{extra} первого контура наибольший в начальной стадии переходного процесса и не предполагает возврата частоты сети к номинальному значению. Для обеспечения возврата частоты в приемлемую область используется второй контур, который имитирует эффект демпферных обмоток в классическом синхронном генераторе и обеспечивает линейное сглаживание частоты [23].

Применение ФЭУ для регулирования частоты в аварийных режимах возможно двумя способами. Первый способ заключается в использовании накопителей электрической энергии для выдачи дополнительной мощности, второй способ заключается в «недогрузке» ФЭУ в установившемся режиме и задействовании полной мощности в аварийных режимах. В [24] доказано, что первый способ имеет более высокую стоимость, в связи с этим распространенный и основной в настоящее время вариант – это режим «недогруз-

ки» ФЭУ. В этом случае использование синтетической инерции в САУ ФЭУ позволяет добиться формирования оптимального частотного отклика и эффективного поддержания устойчивой работы ЭЭС в целом, в том числе при различном уровне освещенности.

На рис. 2 представлена зависимость мощности от напряжения постоянного тока ФЭУ. Управление контроллера для отслеживания точки максимальной мощности (от англ. Maximum Power Point Tracking (MPPT)) обычно изменяет постоянное напряжение панелей для достижения максимальной эффективности (точка $A1$ на рис. 2). Точка максимальной мощности и соответствующее напряжение постоянного тока зависят от солнечной инсоляции, температуры окружающей среды и температуры солнечных элементов. Для обеспечения максимальной выдачи мощности ФЭУ существует множество методов MPPT [25]. Чтобы разгрузить ФЭУ, напряжение на фотоэлектрическом элементе повышается выше точки MPPT на величину ΔU [26], выходная мощность уменьшается (точка $A2$ на рис. 2), и создается резерв мощности, который может быть использован для обеспечения инерционного отклика и участия в регулировании частоты.

С учетом вышеизложенного далее в исследованиях используется схема, обеспечивающая «разгрузку» ФЭУ и блока СИ (рис. 3).

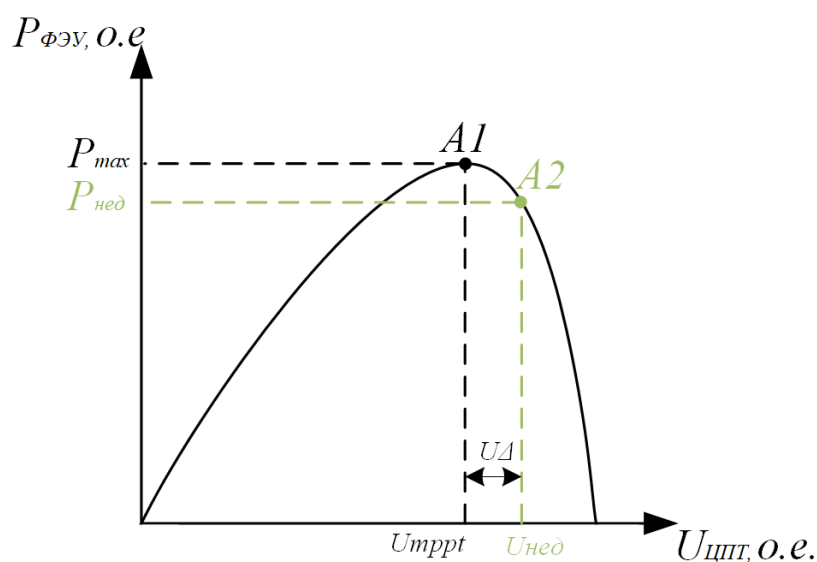


Рис. 2. Зависимость мощности от напряжения постоянного тока фотоэлектрической установки
Fig. 2. Power vs DC voltage of the photovoltaic installation

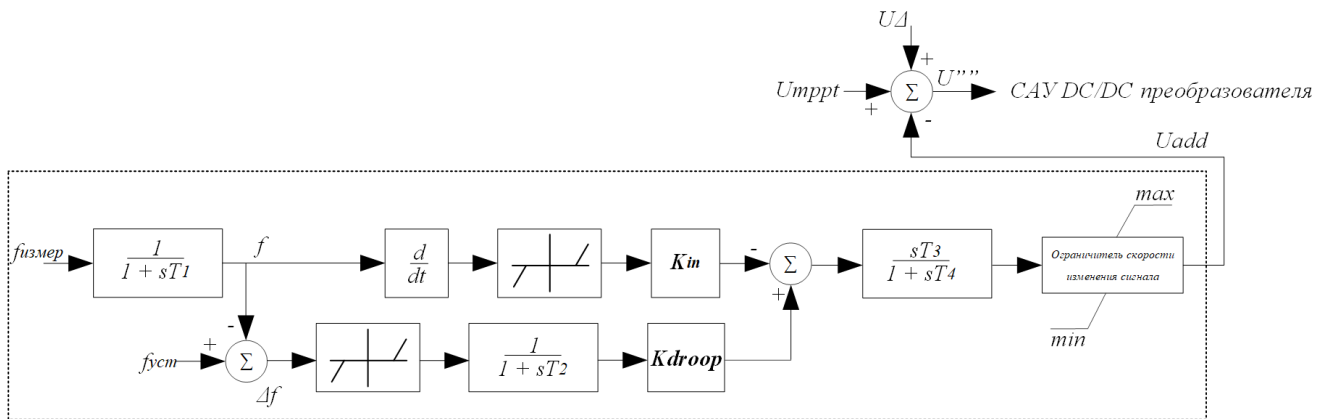


Рис. 3. Модификация системы автоматического управления фотоэлектрической установки, в состав которой входит блок синтетической инерции с двухканальным управлением [8, 15, 24, 26]
Fig. 3. Modification of the automatic control system of the photovoltaic installation including a synthetic inertia unit with a two-channel control [8, 15, 24, 26]

ОПИСАНИЕ ТЕСТОВОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И СХЕМЫ ИСПОЛЪЗУЕМОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Для исследований была реализована трехмашинная ЭЭС, представленная на рис. 4. В узел № 5 внедряется ФЭУ (рис. 5), подключение которой в сеть осуществляется с помощью статического преобразователя напряжения (инвертора). При мощности ФЭУ,

составляющей 25 МВт, доля ее участия соответствует 40% от установленной мощности. В режиме «недогрузки» ФЭУ имеется резерв мощности 2,5 МВт, что составляет 10% от установленной мощности [26]. Для представленной топологии сети (см. рис. 4) проводилось следующее возмущение: наброс нагрузки на шине 3. Наброс нагрузки позволяет оценить влияния блока СИ на инерционный отклик сети.

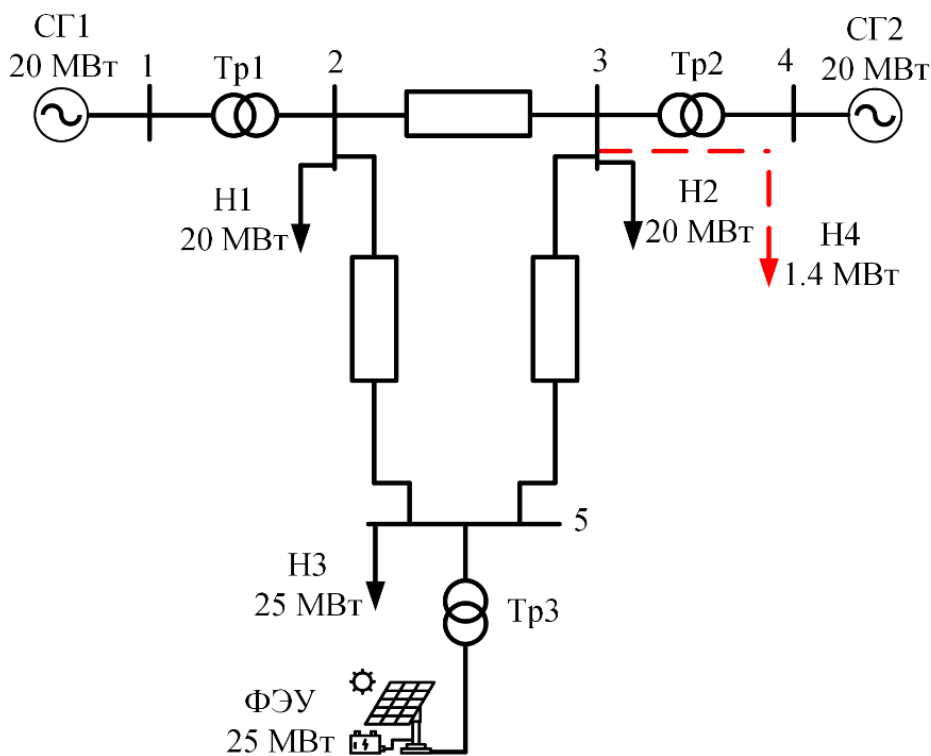


Рис. 4. Тестовая трехмашинная энергосистема
Fig. 4. Test three-machine power system

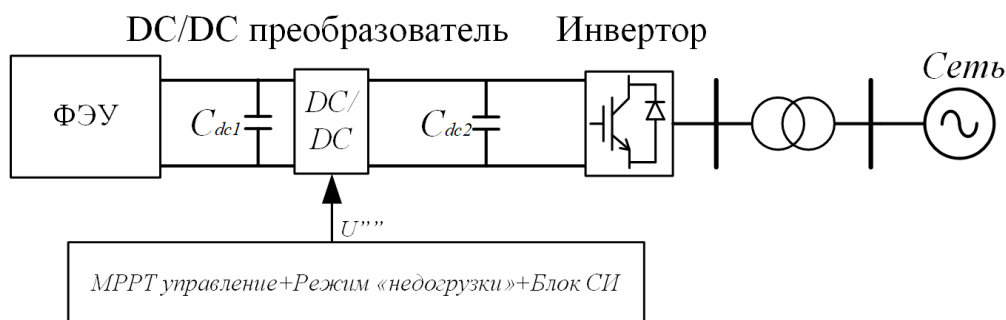


Рис. 5. Структурная схема фотоэлектрической установки с модернизированной системой автоматического управления

Fig. 5. Block diagram of the photovoltaic installation with an upgraded automatic control system

Для исследования влияния блока СИ на устойчивость по частоте реализованы 2 варианта схемно-режимных условий: «сильная» и «слабая» сеть. Под «сильной» сетью подразумевается, что коэффициент короткого замыкания (ККЗ) данной сети более 10 о.е. (ККЗ «сильной» сети = 14,36), соответственно, ККЗ «слабой» сети составит менее 10 о.е. (ККЗ «слабой» сети = 7,54) [27].

$$KKZ = \frac{S_{\min}}{P_{ВИЭ}}, \text{ о.е.}, \quad (1)$$

где S_{\min} – минимальное значение мощности короткого замыкания в точке подключения ВИЭ к сети без учета влияния ВИЭ, МВ·А; $P_{ВИЭ}$ – номинальная мощность ВИЭ, МВт.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАСТРОЙКИ БЛОКА СИНТЕТИЧЕСКОЙ ИНЕРЦИИ И БЛОКА ФАЗОВОЙ АУТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО ЧАСТОТЕ

Для блока СИ были приняты коэффициенты согласно [28, 29], дифференциальный коэффициент « K_{in} » принимаем равным 2Н ($K_{in} = 40$). Пропорциональный коэффициент « K_{droop} » рассчитывается по формуле относительно топологии сети (2).

$$K_{droop} = \frac{P_g}{R} = 20 \text{ [о.е.]}, \quad (2)$$

где P_g – мощность ФЭУ, о.е.; R – эквивалентный коэффициент статизма синхронных генераторов.

Исследование влияния пропорционального и дифференциального коэффициента блока синтетической инерции на устойчивость энергосистемы по частоте. На рис. 6 и 7 представлены осциллограммы изменения частоты при варьировании дифференциального коэффициента блока СИ.

Из рис. 6 и 7 видно, что увеличение дифференциального коэффициента приводит к уменьшению просадки частоты, при этом наблюдаются демпфирования колебаний как в «сильной», так и в «слабой» сети. Использование дифференциального коэффициента большего значения положительно влияет на переходный процесс при набросе нагрузки.

Аналогичным образом происходило варьирование пропорционального коэффициента блока СИ, результаты представлены на рис. 8 и 9.

Из рис. 8 и 9 видно, что увеличение пропорционального коэффициента приводит к уменьшению просадки частоты как в «сильной», так и в «слабой» сети. Увеличение пропорционального коэффициента до значения 300 положительно влияет на переходный процесс в «сильной» сети, дальнейшее увеличение коэффициента приводит к перерегулированию, что, в свою очередь, приводит к уменьшению устойчивости сети. Данный процесс имеет такую же тенденцию и для «слабой» сети.

Увеличение коэффициентов блока СИ положительно влияет на устойчивость ЭЭС по частоте. Однако варьирование коэффициентов должно происходить в допустимых пределах, чтобы избежать отрицательной тенденции изменения частоты, которая мо-

жет привести к аварийной ситуации и неустойчивому состоянию ЭЭС; соответственно, при корректной настройке блока СИ мож-

но сохранить и повысить устойчивость ЭЭС, что подтверждается полученными результатами экспериментов.

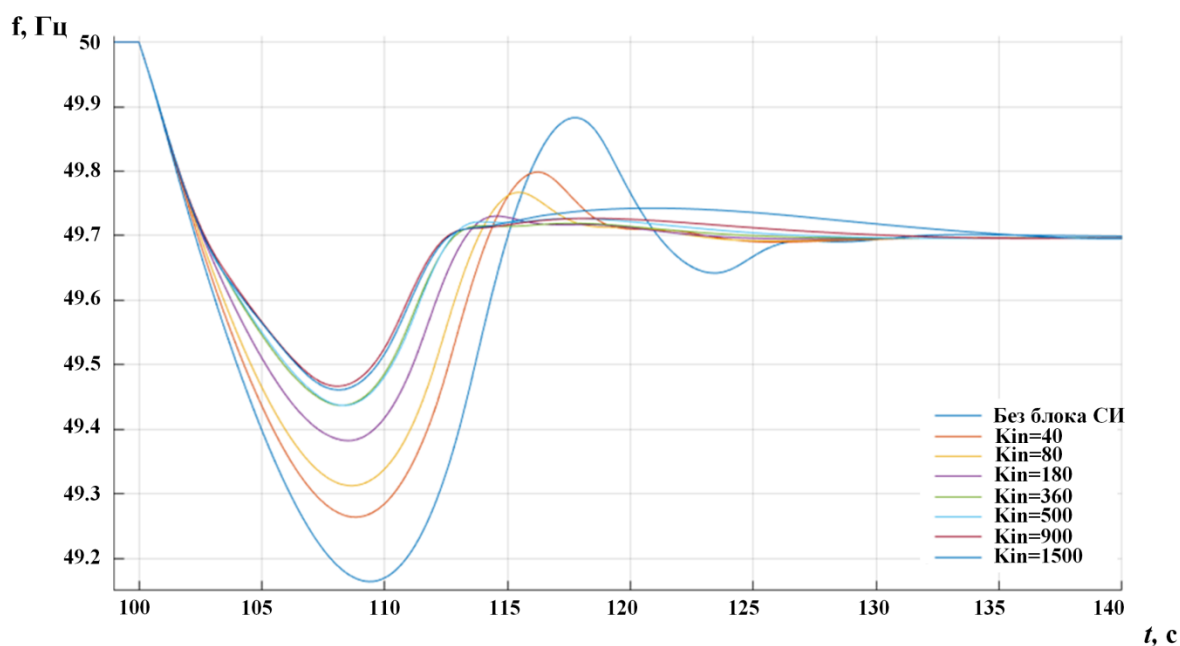


Рис. 6. Осциллограммы изменения частоты при варьировании коэффициента «Kin» блока синтетической инерции ($K_{droop} = \text{const} = 20$; коэффициент короткого замыкания сети = 14,36)

Fig. 6. Waveforms of frequency changes when varying the Kin coefficient of the synthetic inertia unit ($K_{droop} = \text{const} = 20$; network short circuit coefficient = 14.36)

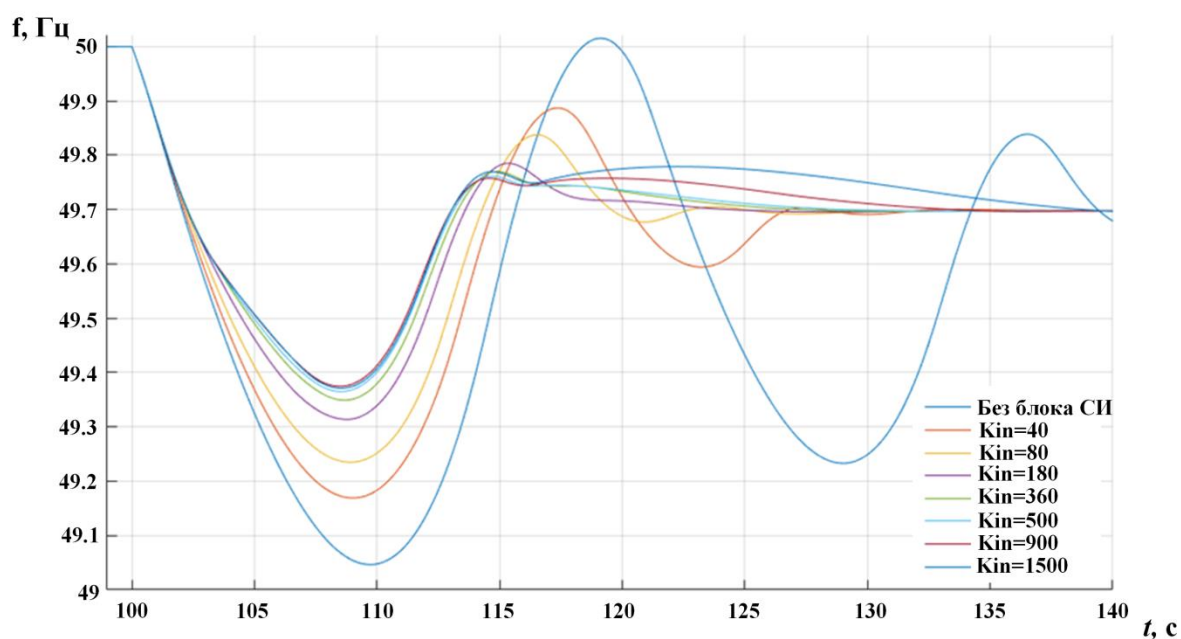


Рис. 7. Осциллограммы изменения частоты при варьировании коэффициента «Kin» блока синтетической инерции ($K_{droop} = \text{const} = 20$; коэффициент короткого замыкания сети = 7,54)

Fig. 7. Waveforms of frequency changes when varying the Kin coefficient of the synthetic inertia unit ($K_{droop} = \text{const} = 20$; network short circuit coefficient = 7.54)

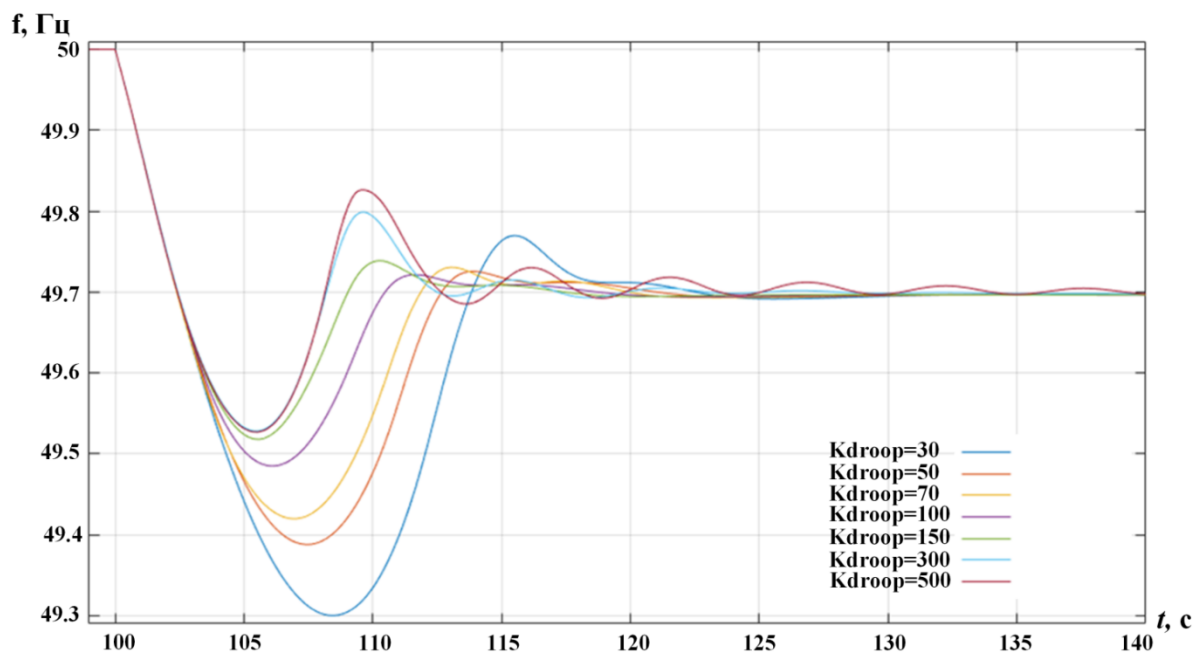


Рис. 8. Осциллограммы изменения частоты при варьировании коэффициента «Kdroop» блока синтетической инерции ($K_{in} = \text{const} = 40$; коэффициент короткого замыкания сети = 14,36)
Fig. 8. Waveforms of frequency changes when varying the Kdroop coefficient of the synthetic inertia unit ($K_{in} = \text{const} = 40$; network short circuit coefficient = 14.36)

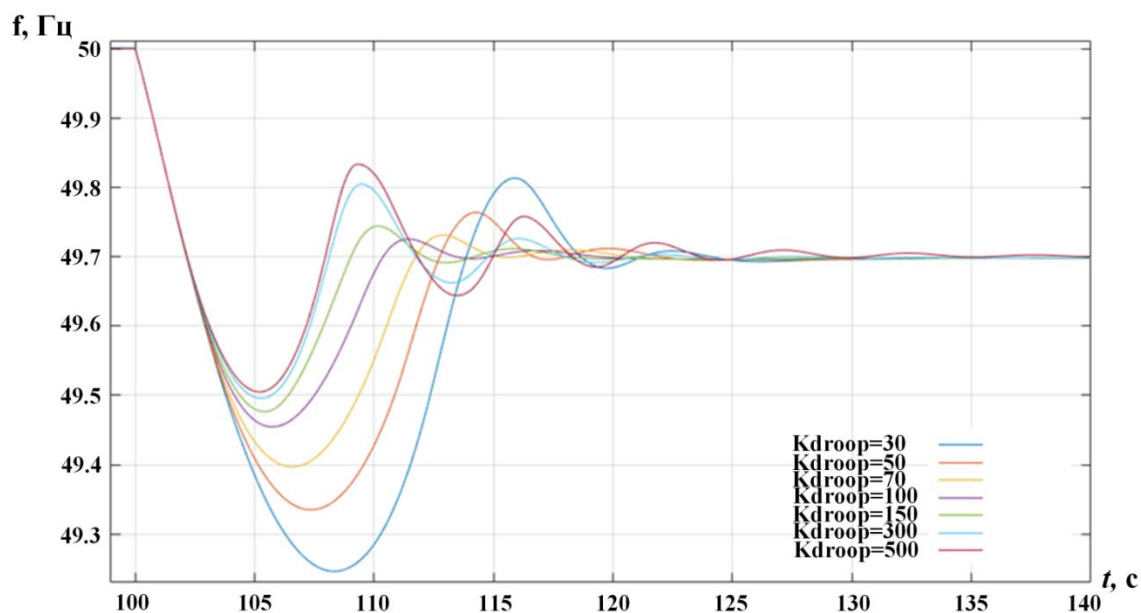


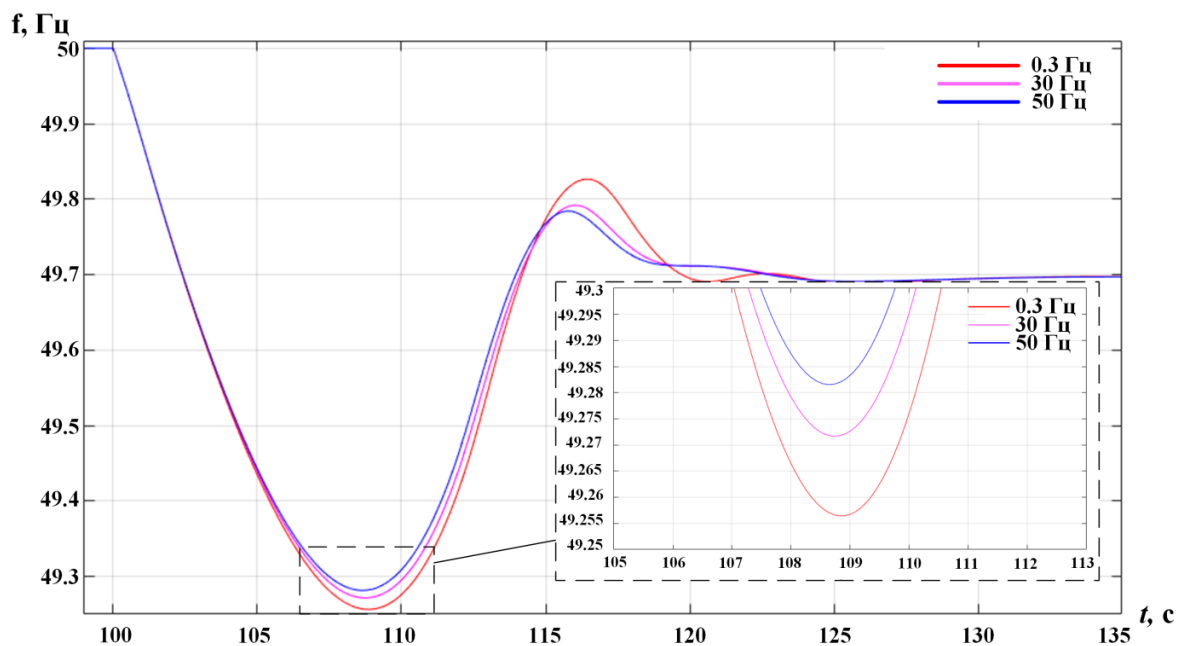
Рис. 9. Осциллограммы изменения частоты при варьировании коэффициента «Kdroop» ($K_{in} = \text{const} = 40$; коэффициент короткого замыкания сети = 7,54)
Fig. 9. Waveforms of frequency changes when varying the Kdroop coefficient ($K_{in} = \text{const} = 40$; network short circuit coefficient = 7.54)

Исследование влияния полосы пропускания фазовой автоподстройки частоты на функционирование блока синтетической инерции. Как было сказано выше, исследование проводилось для

«сильной» и «слабой» сети, изменение полосы пропускания ФАПЧ в сетях с разным ККЗ приводило к разным результатам. Расчет полосы пропускания блока ФАПЧ производился согласно [30]. Полосы пропускания для ис-

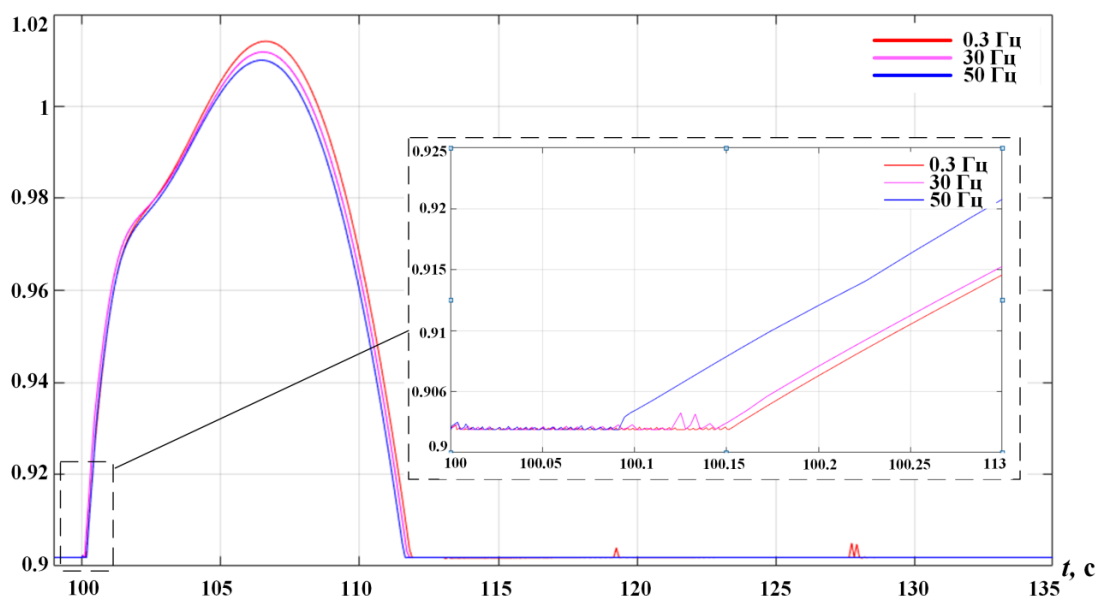
следований были приняты следующие: 0,3 Гц ($K_i = 0,83$; $K_p = 1,2$), 30 Гц ($K_i = 8390$; $K_p = 130$) и 50 Гц ($K_i = 20500$; $K_p = 240$) и коэффициенты блока СИ принимаем $K_{in} = 40$; $K_{dpoor} = 20$.

На рис. 10 и 11 представлены осциллограммы изменения частоты и осциллограммы изменения сигнала блока СИ при различной полосе пропускания ФАПЧ в «сильной» и «слабой» сети, соответственно.



a

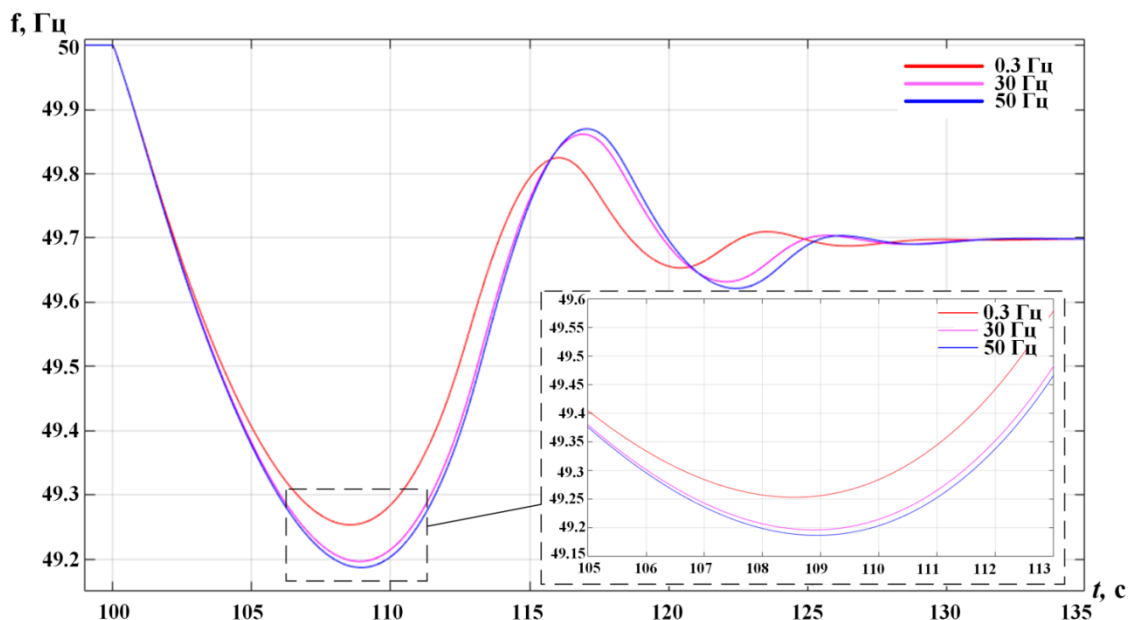
Сигнал блока СИ, о.е



b

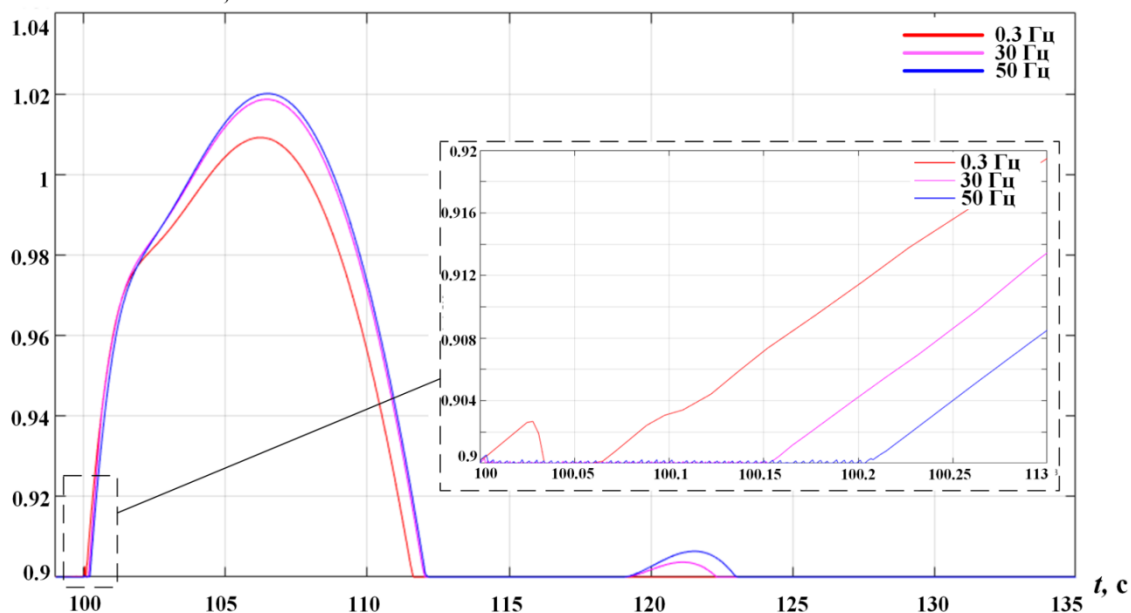
Рис. 10. Осциллограммы переходного процесса в «сильной» сети: а – изменение частоты при различной полосе пропускания блока фазовой автоподстройки частоты; б – изменение сигнала блока синтетической инерции при различной полосе пропускания блока фазовой автоподстройки частоты

Fig. 10. Waveforms of the transient process in a 'strong' network: а – frequency change under different bandwidth of the phase-locked loop frequency control unit; б – signal change of the synthetic inertia unit under different bandwidth of the phase-locked loop frequency control unit



a

Сигнал блока СИ, о.е



b

Рис. 11. Осциллограммы переходного процесса в «слабой» сети: *a* – изменение частоты при различной полосе пропускания блока фазовой автоподстройки частоты; *b* – изменение сигнала блока синтетической инерции при различной полосе пропускания блока фазовой автоподстройки частоты

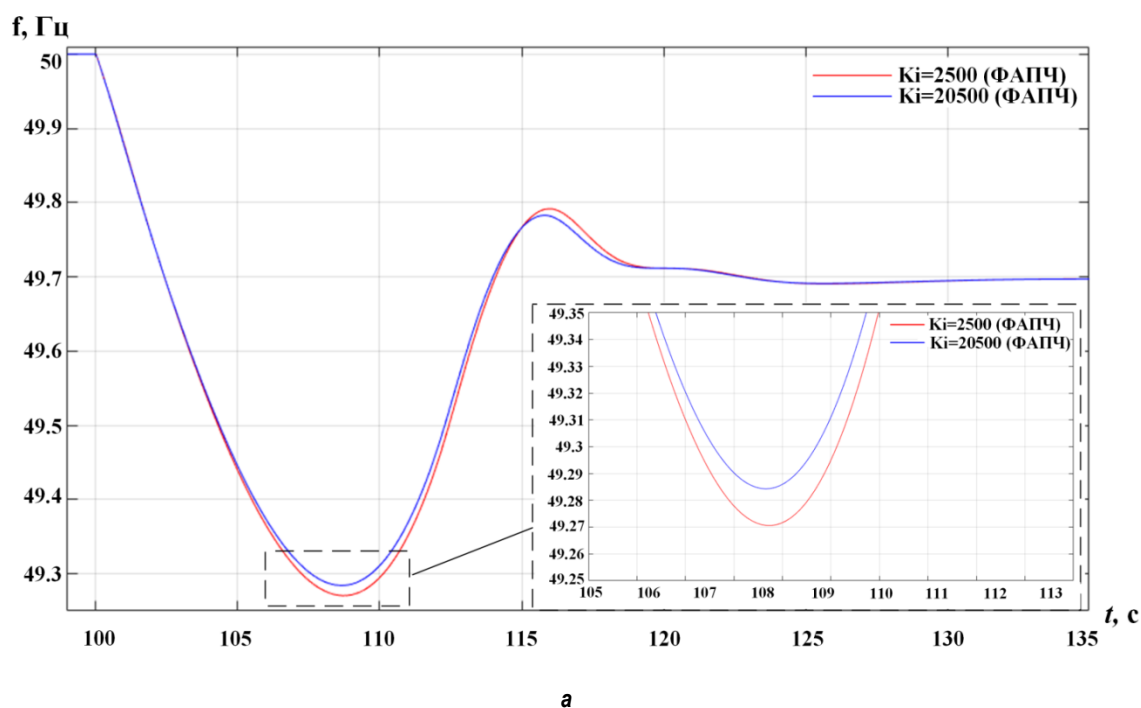
Fig. 11. Waveforms of the transient process in a ‘weak’ network: *a* – frequency change under different bandwidth of the phase-locked loop frequency control unit; *b* – signal change of the synthetic inertia unit under different bandwidth of the phase-locked loop frequency control unit

В «сильной» сети с увеличением полосы пропускания блока ФАПЧ уменьшается величина просадки частоты (см. рис. 10 а). Данный процесс происходит за счет того, что блок ФАПЧ с увлечением полосы пропускания увеличивает скорость реакции блока СИ

(см. рис. 10 б). В «слабой» сети наблюдается противоположная картина (рис. 11 а): блок ФАПЧ с увеличением полосы пропускания уменьшает скорость реакции блока СИ (см. рис. 11 б), что приводит к увеличению просадки частоты.

На рис. 12 и 13 представлены осциллограммы изменения частоты и осциллограммы изменения сигнала блока СИ по дифферен-

циальному каналу при увеличении коэффициента «Ki» блока ФАПЧ в «сильной» и «слабой» сети, соответственно.



Сигнал канала Ki блока СИ, о.е

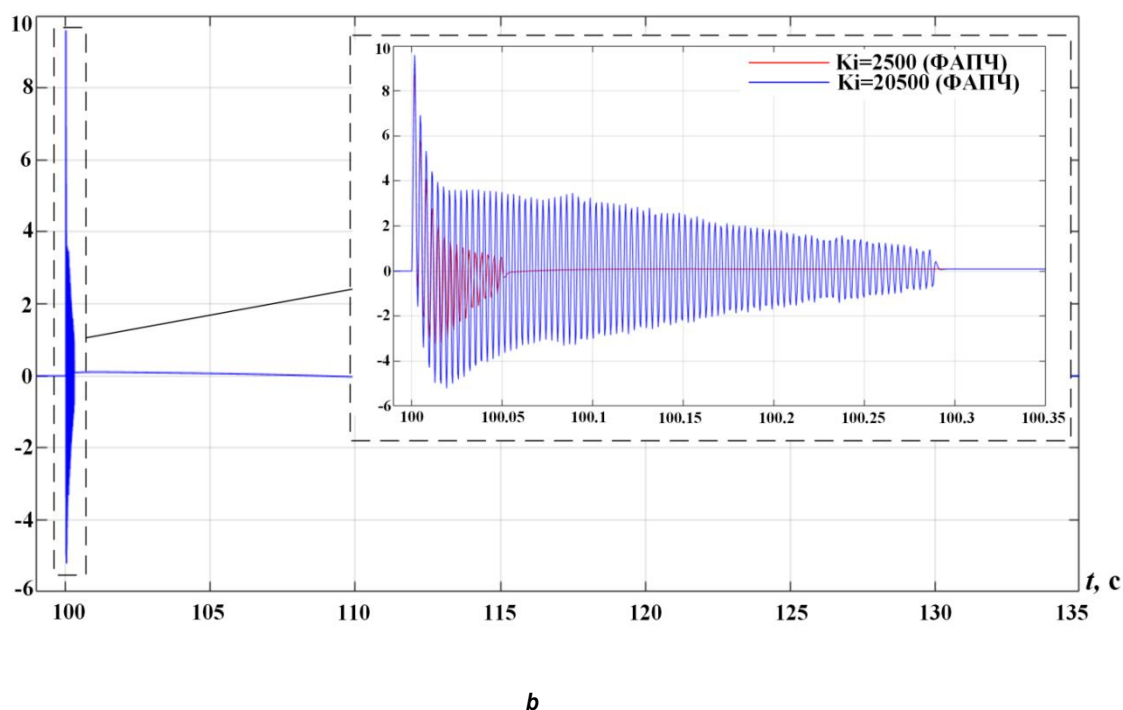


Рис. 12. Осциллограммы переходного процесса в «сильной» сети: а – изменение частоты при различной полосе пропускания блока фазовой автоподстройки частоты; б – изменение сигнала блока синтетической инерции по дифференциальному каналу при увеличении коэффициента «Ki» блока фазовой автоподстройки частоты
Fig. 12. Waveforms of the transient process in a 'strong' network: а – frequency change under different bandwidth of the phase-locked loop frequency control unit; б – change in the signal of the synthetic inertia unit along the differential channel with an increase in the Ki coefficient of the phase-locked frequency control unit

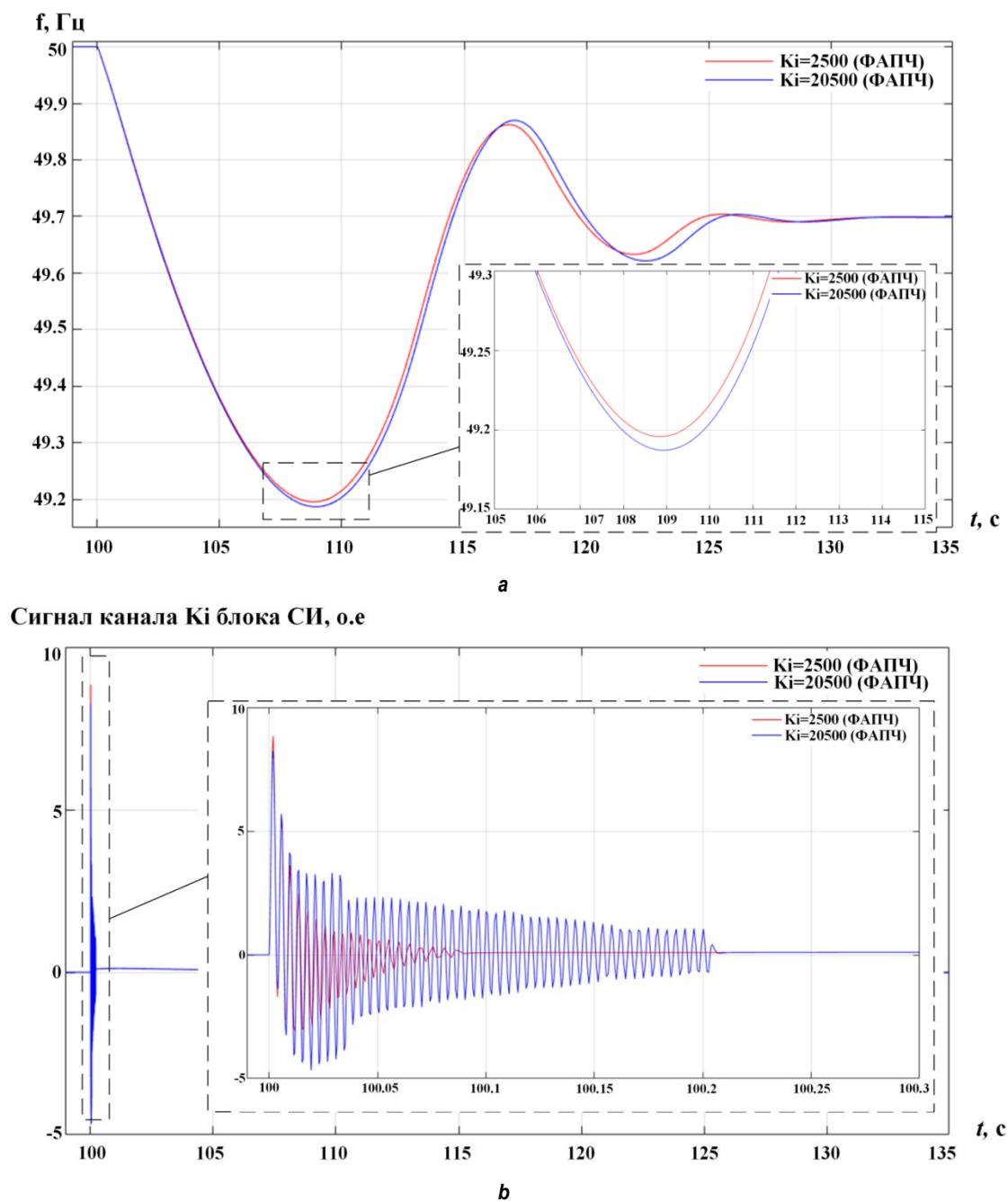


Рис. 13. Осциллограммы переходного процесса в «слабой» сети: *а* – изменение частоты при различной полосе пропускания блока фазовой автоподстройки частоты; *б* – изменение сигнала блока синтетической инерции по дифференциальному каналу при увеличении коэффициента «*Ki*» блока фазовой автоподстройки частоты
Fig. 13. Waveforms of the transient process in a ‘weak’ network: *a* – frequency change under the different bandwidth of the phase-locked loop frequency control unit; *b* – change in the signal of the synthetic inertia unit along the differential channel with an increase in *Ki* coefficient of the phase-locked loop frequency control unit

В момент возмущения при большем коэффициенте «*Ki*» блока ФАПЧ в дифференциальном канале блока СИ генерируется сигнал большей амплитуды (см. рис. 12 *б*), что приводит к меньшей просадке частоты ЭЭС (см. рис. 12 *а*), в «слабой» сети получается обратный процесс (см. рис. 13 *а, б*).

На рис. 14 и 15 представлены осциллограммы изменения частоты и осциллограммы изменения сигнала блока СИ по дифференциальному каналу при увеличении коэффициента «*Kp*» блока ФАПЧ в «сильной» и «слабой» сети, соответственно.

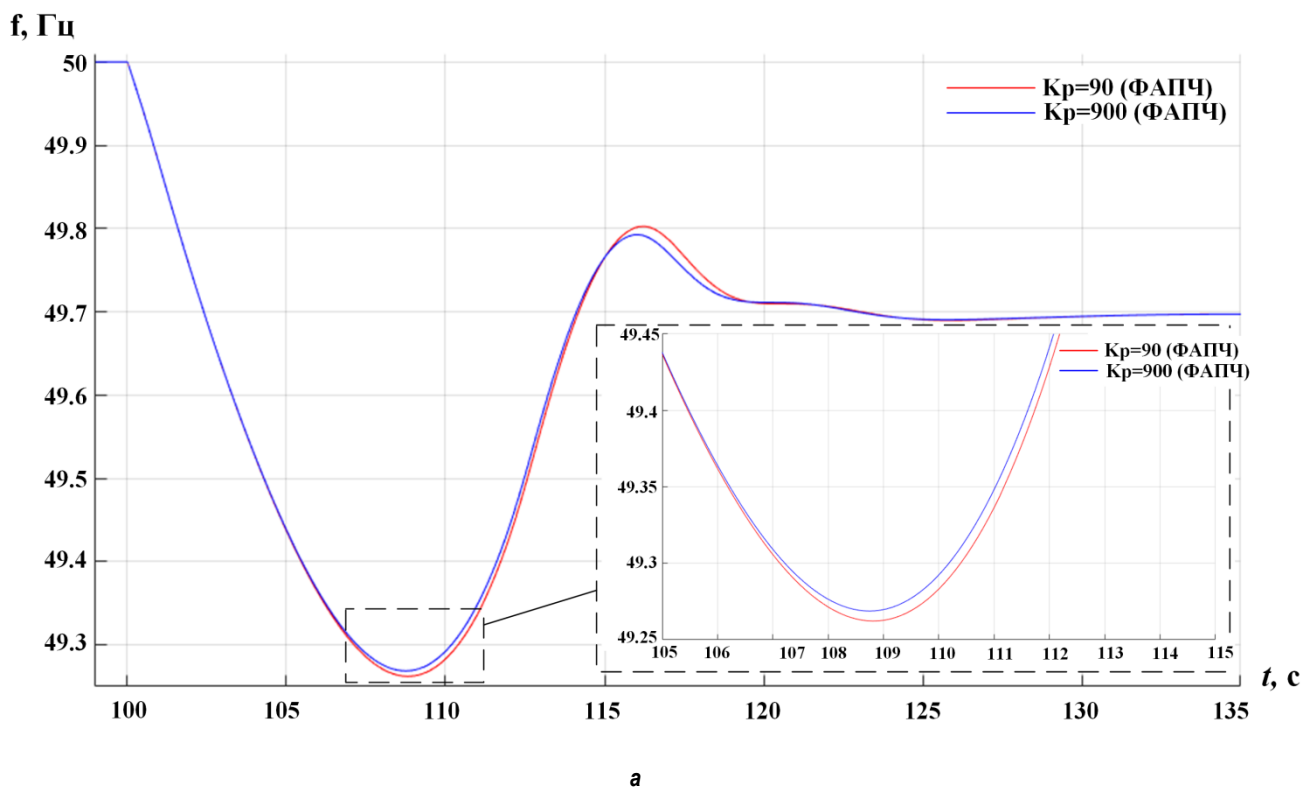
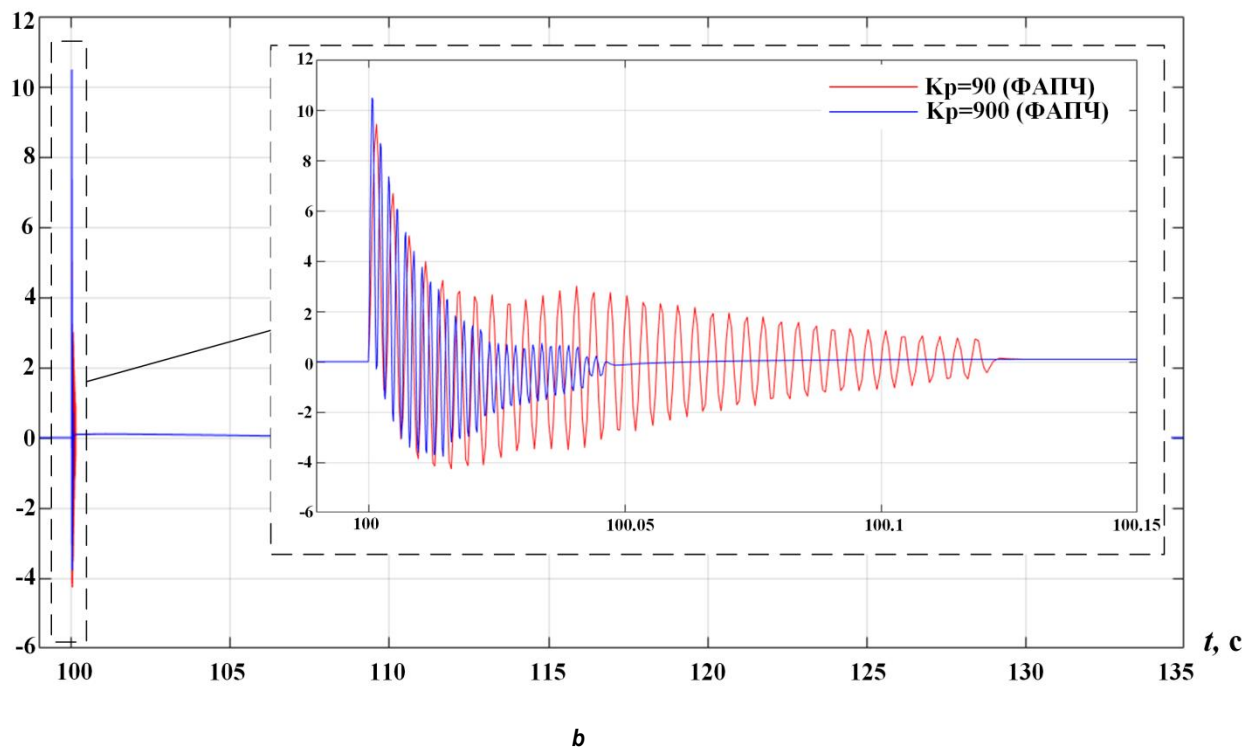
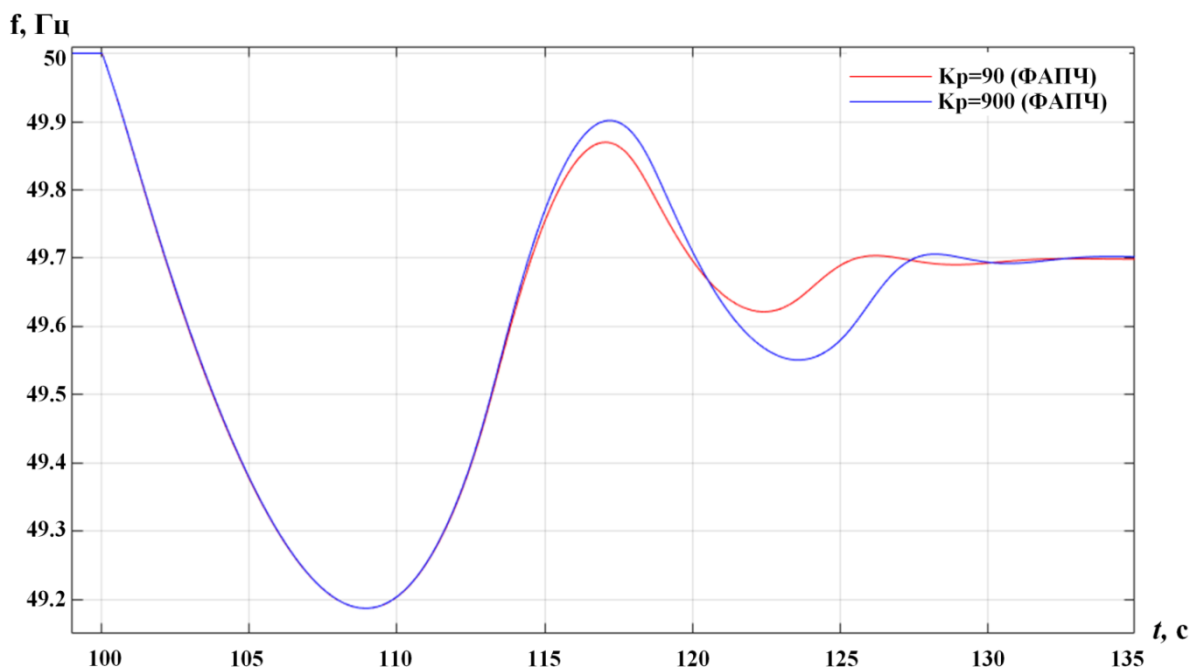
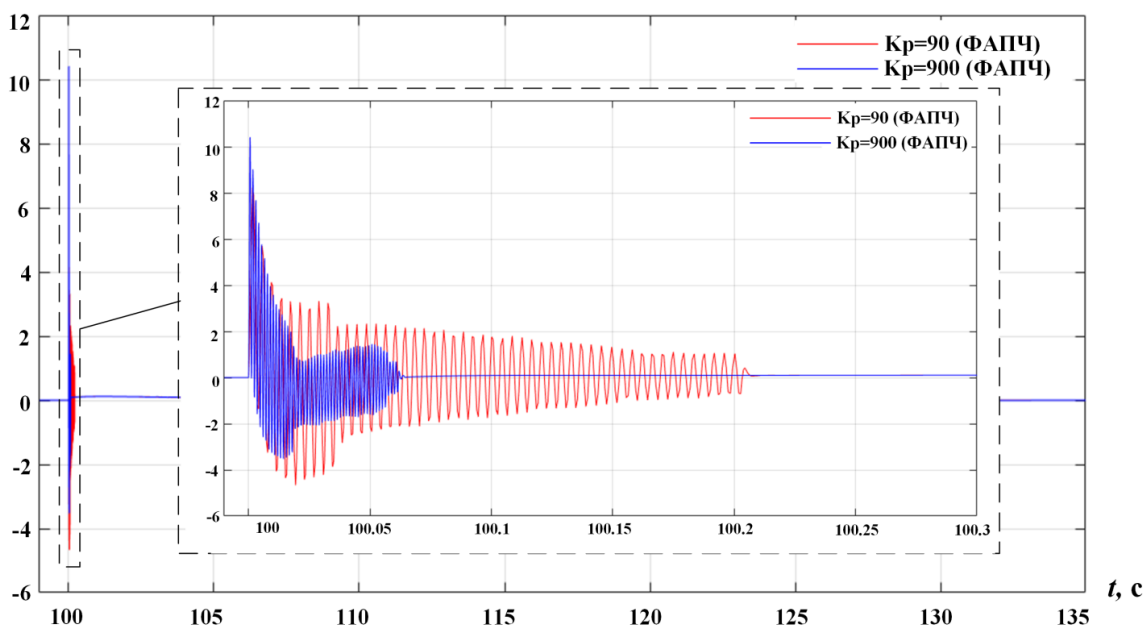
Сигнал канала K_i блока СИ, о.е

Рис. 14. Осциллограммы переходного процесса в «сильной» сети: а – изменение частоты при различной полосе пропускания блока фазовой автоподстройки частоты; б – изменение сигнала блока синтетической инерции по дифференциальному каналу при увеличении коэффициента « K_p » блока фазовой автоподстройки частоты
Fig. 14. Waveforms of the transient process in a 'strong' network: a – frequency change under different bandwidth of the phase-locked loop frequency control unit; b – change in the signal of the synthetic inertia unit along the differential channel with an increase in the K_p coefficient of the phase-locked loop frequency control unit



a

Сигнал канала Кі блока СИ, о.е



b

Рис. 15. Осциллограммы переходного процесса в «слабой» сети: а – изменение частоты при различной полосе пропускания фазовой автоподстройки частоты; б – изменение сигнала блока синтетической инерции по дифференциальному каналу при увеличении коэффициента «Кр» блока фазовой автоподстройки частоты
Fig. 15. Waveforms of the transient process in a 'weak' network: a – frequency change under different bandwidth of the phase-locked loop frequency control; b – change in the signal of the synthetic inertia unit along the differential channel with an increase in the Kp coefficient of the phase-locked loop frequency control unit

При увеличении коэффициента «Кр» в «сильной» сети наблюдается положительная тенденция изменения частоты: уменьшается уровень просадки частоты (см. рис. 14 а) за

счет того, что дифференциальный канал блока СИ генерирует сигнал большей амплитуды (см. рис. 14 б). С увеличением коэффициента «Кр» в «слабой» сети тенденция изменения

частоты имеет отрицательный характер (рис. 15 *a, b*), наблюдается эффект перерегулирования на втором цикле колебаний, что связано с интенсивностью генерирования сигнала дифференциального канала блока СИ.

Изменение параметров настроек блока ФАПЧ в системе управления силового преобразователя позволяет влиять на характеристики процесса снижения частоты, но для «сильной» и «слабой» сети требуется разный подход в настройке.

Исследование влияния полосы пропускания фазовой автоподстройки частоты на функционирование блока синтетической инерции в энергосистеме реальной размерности. Исследование проводилось на тестовой энергосистеме реальной размерности, которая содержит 177 узлов (рис. 16).

ФЭУ внедряется в узел № 176. Внедрение ФЭУ в данный район обосновано подходящими климатическими условиями, район расположен вблизи зоны максимальной интенсивности солнечного излучения. Внедрение ФЭУ позволяет решить проблемы дефи-

цитного энергорайона и является одним из возможных решений по повышению надежного и устойчивого электроснабжения. В то же время данный район является «слабым» ($ККЗ < 10$ о.е.), поэтому в нем важно учитывать выявленные закономерности как в разделе «Исследование влияния полосы пропускания фазовой автоподстройки частоты на функционирование блока синтетической инерции».

Для исследования влияния полосы пропускания ФАПЧ на функционирование блока СИ выполнен наброс нагрузки в узле № 170. Связь энергорайона с остальной частью энергосистемы осуществляется по двухцепной линии электропередач. Коэффициенты блока СИ рассчитываются аналогично [28, 29], полосы пропускания блока ФАПЧ принимаются как и в разделе «Исследование влияния полосы пропускания фазовой автоподстройки частоты на функционирование блока синтетической инерции».

На рис. 17 представлены осциллограммы переходных процессов в энергосистеме реальной размерности.

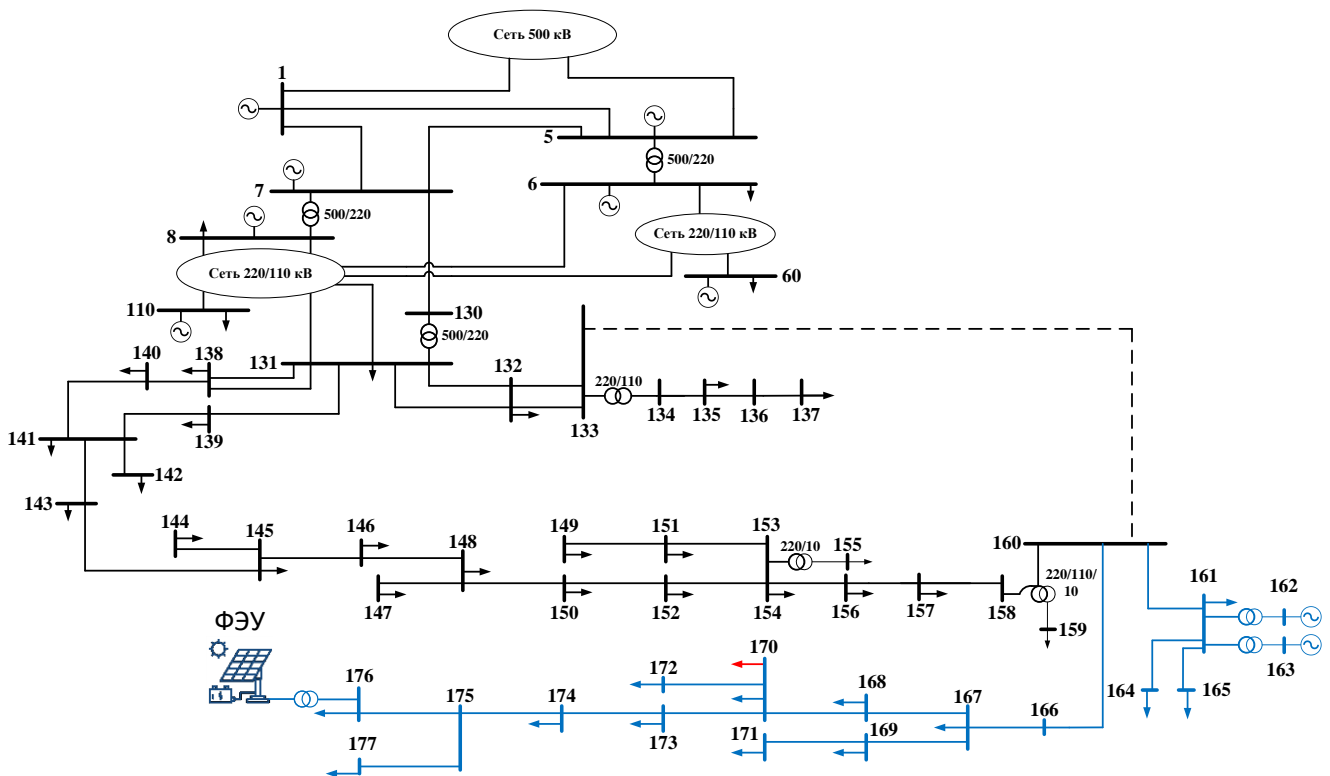
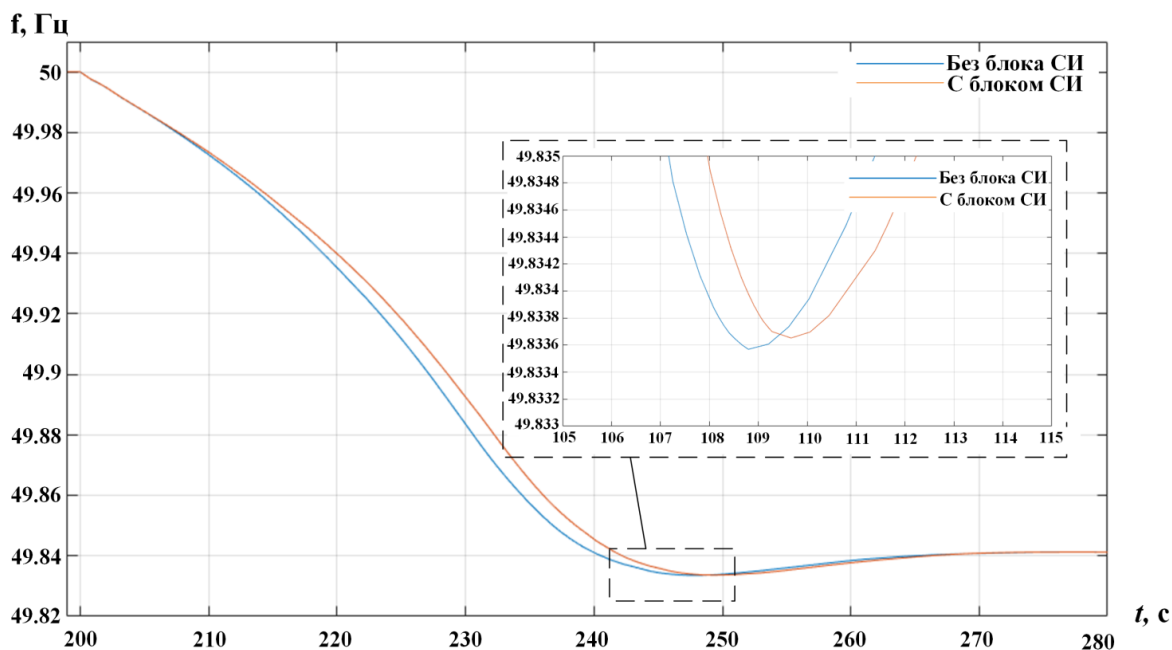


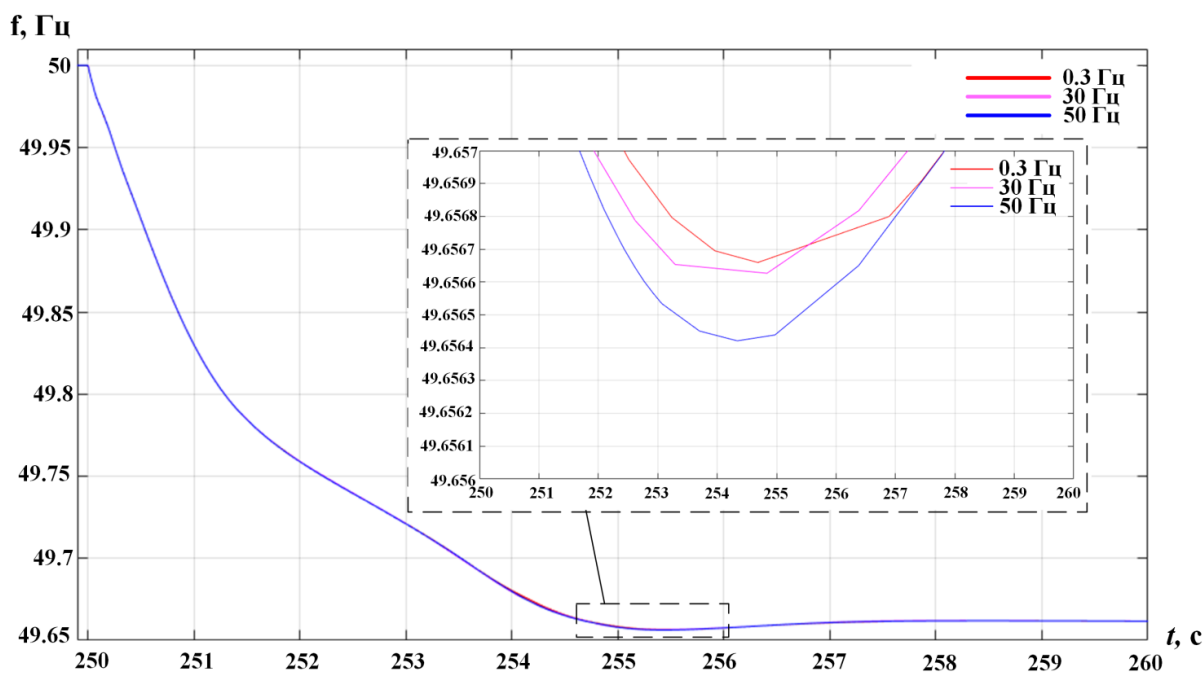
Рис. 16. Тестовая энергосистема реальной размерности
Fig. 16. Test power system of actual dimensions

Очевидно, что в ЭЭС реальной размерности внедрение ФЭУ в целом не оказывает существенного влияния на переходные процессы и не снижает кардинально общую инерцию, однако для удаленного энергорайона вклад ФЭУ, в том числе с блоком СИ и

разной настройкой блока ФАПЧ, может оказывать влияние на переходные процессы. Из рис. 17 а видно, что использование блока СИ положительно влияет на устойчивость ЭЭС по частоте, уменьшается просадка частоты. Из рис. 17 б следует, что увеличение полосы



a



b

Сигнал блока СИ, о.е

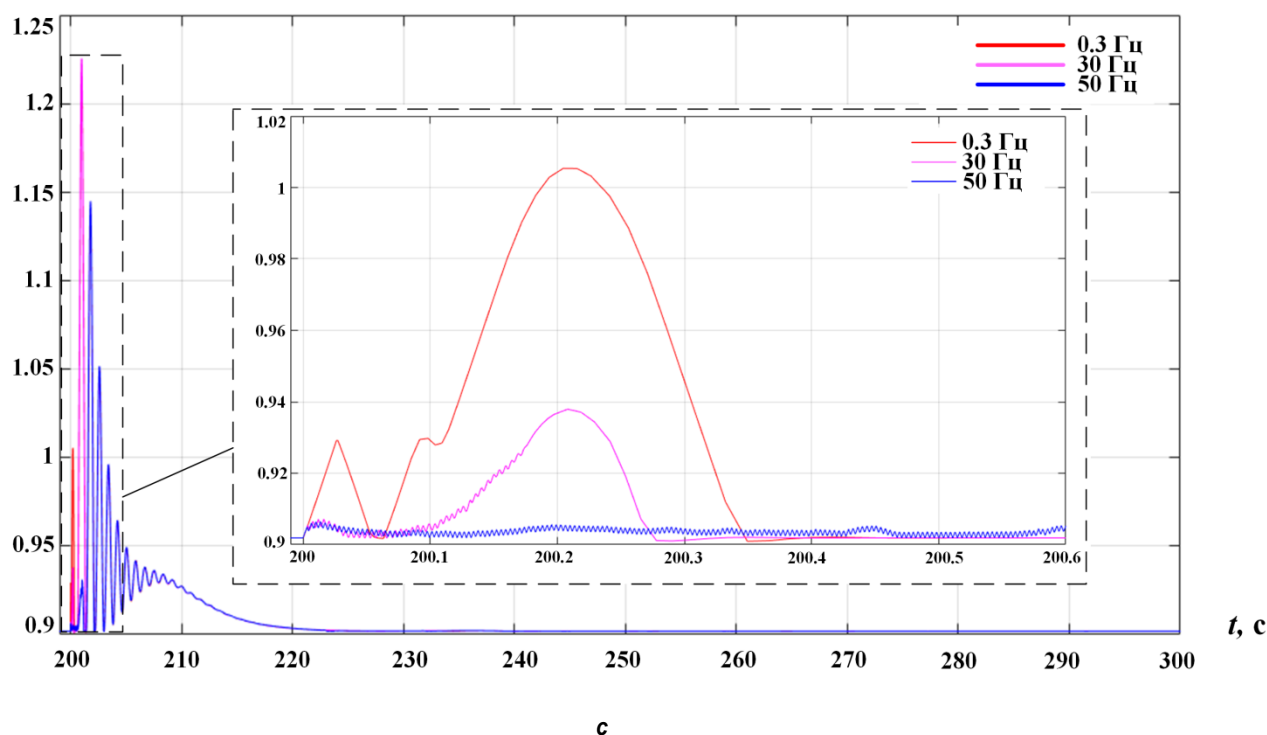


Рис. 17. Осциллограммы переходного процесса в энергосистеме реальной размерности:
a – изменение частоты в узле 176 при функционировании фотоэлектрической установки с блоком синтетической инерции и без него; b – изменение частоты в узле 176 при варьировании полосы пропускания блока фазовой автоподстройки частоты; c – изменение сигнала блока синтетической инерции при варьировании полосы пропускания блока фазовой автоподстройки частоты

Fig. 17. Waveforms of the transient process in the power system of actual dimensions:
a – frequency change in the node 176 under the operation of a photovoltaic installation with and without a synthetic inertia unit; b – frequency change in the node 176 under bandwidth variation of the phase-locked loop frequency control unit; c – changes in the signal of the synthetic inertia unit under the bandwidth variation of the phase-locked loop frequency control unit

пропускания блока ФАПЧ приводит к увеличению просадки частоты в ЭЭС, данный процесс происходит за счет того, что с увеличением полосы пропускания блока ФАПЧ уменьшается скорость реакции блока СИ (см. рис. 17 с). Закономерности, полученные в разделе «Исследование влияния полосы пропускания фазовой автоподстройки частоты на функционирование блока синтетической инерции», для тестовой ЭЭС наблюдаются и в ЭЭС реальной размерности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье исследовано влияние блока СИ на устойчивость ЭЭС по частоте. Отмечено, что корректная настройка блока СИ оказывает существенное влияние на устойчивость сети, особенно в сетях с преобладающей долей ВИЭ. Для тестовой схемы ЭЭС результа-

ты наглядно показывают возможность положительного влияния СИ на устойчивость ЭЭС. Отмечено, что варьирование коэффициентов блока СИ сказывается на переходном процессе. При определенной настройке блока СИ можно не только обеспечить требуемый инерционный отклик, но и расширить границы устойчивости. Кроме того, стоит отметить влияние блока ФАПЧ на функционирование блока СИ. Результаты показывают, что изменение полосы пропускания блока ФАПЧ в САУ ФЭУ позволяет влиять на характеристики процесса как снижения, так и увеличения частоты во время переходного процесса, в зависимости от топологии сети. Соответственно, в «сильной» сети с увеличением полосы пропускания блока ФАПЧ уменьшается величина просадки частоты, в «слабой» сети наблюдается противоположная ситуация. При этом закономерности, по-

лученные для «слабой» сети в тестовой ЭЭС, наблюдаются и в ЭЭС реальной размерности.

Исследования доказывают, что проблема моделирования переходных процессов в «слабых» сетях при внедрении ВИЭ является актуальной. Ввиду более колебательного ха-

рактера переходных процессов в таких сетях довольно часто складывается ситуация, что после возмущений начинаются колебания с нарастающей амплитудой, а также блок ФАПЧ требует более точной настройки, в отличие от сетей с «сильными» связями.

Список источников

1. Wu Jianzhong, Yan Jinyue, Jia Hongjie, Hatziaargyriou N., Djilali N., Sun Hongbin. Integrated energy systems // Applied Energy. 2016. Vol. 167. P. 155–157. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.075>.
2. Андреев М. В., Суворов А. А., Аскарлов А. Б., Киевец А. В. Проблема численного моделирования цифровой релейной защиты и ее аналого-цифровое (гибридное) решение // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2018. Т. 61. № 6. С. 77–83. <http://doi.org/10.17213/0136-3360-2018-6-77-83>.
3. Андреев М. В., Рубан Н. Ю., Гордиенко И. С. Всережимное математическое моделирование релейной защиты электроэнергетических систем: монография. Томск: Изд-во ТПУ, 2016. 176 с.
4. Sinsel S. R., Riemke R. L., Hoffmann V. H. Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources – a review // Renewable Energy. 2020. Vol. 145. P. 2271–2285. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.147>.
5. Кошельков И. А., Егоров Е. П., Иванов А. В. Задачи моделирования при проведении функциональных испытаний микропроцессорных устройств РЗА // Электроэнергетика глазами молодежи – 2016: труды VII Междунар. молодежной науч.-техн. конф. (г. Казань, 19–23 сентября 2016 г.). Казань: Изд-во КГЭУ, 2016. Т. 1. С. 364–366.
6. Huang Shun-Hsien, Schmall J., Conto J., Adams J., Zhang Yang, Carter C. Voltage control challenges on weak grids with high penetration of wind generation: ERCOT experience // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2012. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6344713>.
7. Liu Huakun, Xie Xiaorong, He Jingbo, Xu Tao, Yu Zhao, Wang Chao, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak ac networks // IEEE Transactions on Power Systems. 2017. Vol. 32. Iss. 6. P. 4708–4720. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2682197>.
8. Cheng Yi, Azizpanah-Abarghoee R., Azizi S., Ding Lei, Terzija Vladimir. Smart frequency control in low inertia energy systems based on frequency response techniques: a review // Applied Energy. 2020. Vol. 279. P. 115798. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115798>.
9. Mahadevan N., Dubey A., Guo Huangcheng, Karsai G. Using temporal causal models to isolate failures in power system protection devices // IEEE Instrumentation Measurement and measurement log. 2014. Vol. 18. Iss. 4. P. 28–39. <https://doi.org/10.1109/AUTEST.2014.6935156>.
10. Johnson S. C., Rhodes J. D., Webber M. E. Understanding the impact of nonsynchronous wind and solar generation on grid stability and identifying mitigation pathways // Applied Energy. 2020. Vol. 262. P. 114492. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114492>.
11. Seneviratne C., Ozansoy C. Frequency response due to a large generator loss with the increasing penetration of wind/PV generation – a literature review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 57. P. 659–668. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.051>.
12. Razzhivin I., Askarov A., Rudnik V., Suvorov A. A Hybrid simulation of converter-interfaced generation as the part of a large-scale power system model // International Journal of Engineering and Technology Innovation. 2021. Vol. 11. No. 4. P. 278–293. <https://doi.org/10.46604/ijeti.2021.7276>.
13. Arani M. F. M., El-Saadany E. F. Implementing virtual Inertia in DFIG-Based wind power generation // IEEE Transactions on Power Systems. 2013. Vol. 28. Iss. 2. P. 1373–1384. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2207972>.
14. Zhong Cheng, Zhou Yang, Yan Gangui. Power reserve control with real-time iterative estimation for PV system participation in frequency regulation // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2021. Vol. 124. P. 106367. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106367>.
15. Nguyen Ha Thi, Yang Guangya, Nielsen Arne Hejde, Jensen P. H. Frequency stability enhancement for low inertia systems using synthetic inertia of wind power // IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2017. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2017.8274566>.
16. Qi Hu, Lijun Fu, Fan Ma, Feng Ji. Large signal synchronizing Instability of PLL-based VSC connected to weak ac grid // IEEE Transactions on Power Systems. 2019. Vol. 34. Iss. 4. P. 3220–3229. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2892224>.
17. Wang Yi Fei, Li Yun Wei. Analysis and digital implementation of cascaded delayed-signal-cancellation PLL // IEEE Transactions on Power Electronics. 2011. Vol. 26. Iss. 4. P. 1067–1080. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2091150>.
18. Zhou Jenny Z., Ding Hui, Fan Shengtao, Zhang Yi, Gole A. M. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter // IEEE Transactions on Power Delivery. 2014. Vol. 29. Iss. 5. P. 2287–2296. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2330518>.
19. Magnus D. M., Scharlau C. C., Pfitscher L. L.,

Costa G. C., Silva G. M. A novel approach for robust control design of hidden synthetic inertia for variable speed wind turbines // *Electric Power Systems Research*. 2021. Vol. 196. P. 107267. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107267>.

20. Gutierrez F., Riquelme E., Barbosa K. A., Chávez H. State estimation for synthetic inertia control system using kalman filter // *IEEE International Conference on Automation/24th Congress of the Chilean Association of Automatic Control*. 2021. <https://doi.org/10.1109/ICAACCA51523.2021.9465316>.

21. Nguyen Ha Thi, Chleirigh M. N., Yang Guangya. A technical economic evaluation of inertial response from wind generators and synchronous condensers // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 7183–7192. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3049197>.

22. Mohammad D., Mokhlis H., Mekhilef S. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 69. P. 144–155. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.170>.

23. Bevrani H., Ise T., Miura Y. Virtual synchronous generators: a survey and new perspectives // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2014. Vol. 54. P. 244–254. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.07.009>.

24. Zarina P. P., Mishra S., Sekhar P. C. Exploring frequency control capability of a PV system in a hybrid PV-rotating machine-without storage system // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2014. Vol. 60. P. 258–267.

<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.02.033>.

25. Karami N., Moubayed N., Outbib R. General review and classification of different MPPT techniques // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 68. Part 1. P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.132>.

26. Tielens P. Operation and control of power systems with low synchronous inertia. 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/95687043.pdf> (18.09.2021).

27. Fan Lingling. Modeling Type-4 wind in weak grids // *IEEE Transactions on sustainable energy*. 2019. Vol. 10. Iss. 2. P. 853–864. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2849849>.

28. Zhang Shuang, Jiao Long, Zhang Hui, Shi LinJun, Yang HuiBiao. A new control strategy of active participation in frequency regulation of photovoltaic system // *IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (Wuhan, 30 October – 1 November 2020)*. Wuhan: IEEE, 2020. P. 2314–2318. <https://doi.org/10.1109/EI250167.2020.9347015>.

29. Shi Qiaoming, Wang Gang, Ma Weiming, Fu Lijun, Wu You, Xing Pengxiang. Coordinated virtual inertia control strategy for D-PMSG considering frequency regulation ability // *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2016. Vol. 11. Iss. 6. P. 1556–1570. <https://doi.org/10.5370/JEET.2016.11.6.1556>.

30. Sun Yin, De Jong E. C. W., Wang Xiongfei, Yang Dongsheng, Blaabjerg Frede, Cuk V., et al. The Impact of PLL dynamics on the low inertia power grid: a case study of Bonaire island power system // *Energies*. 2019. Vol. 12. No. 7. P. 1259. <https://doi.org/10.3390/en12071259>.

References

1. Wu Jianzhong, Yan Jinyue, Jia Hongjie, Hatziaargyriou N., Djilali N., Sun Hongbin. Integrated energy systems. *Applied Energy*. 2016;167:155-157. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.075>.

2. Andreev M. V., Suvorov A. A., Askarov A. B., Kievets A. V. The problem of digital relay protection numerical simulation and its analog-digital (hybrid) solution. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Scientific and Technical Journal Russian Electromechanics*. 2018;61(6):77-83. (In Russ.). <http://doi.org/10.17213/0136-3360-2018-6-77-83>.

3. Andreev M. V., Ruban N. Yu., Gordienko I. S. *All-mode mathematical simulation of electrical power system relay protection: monograph*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2016, 180 p. (In Russ.).

4. Sinsel S. R., Riemke R. L., Hoffmann V. H. Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources – a review // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 145. P. 2271–2285. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.147>.

5. Koshel'kov I. A., Egorov E. P., Ivanov A. V. Simulation tasks under functional tests of microprocessor-based relay protection and automation devices. In: *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2016: trudy VII Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = Electric power engineering through the eyes of youth – 2016*. 19–

23 September 2016, Kazan'. Kazan': Kazan State Power Engineering University; 2016, vol. 1, p. 364-366. (In Russ.).

6. Huang Shun-Hsien, Schmall J., Conto J., Adams J., Zhang Yang, Carter C. Voltage control challenges on weak grids with high penetration of wind generation: ERCOT experience. In: *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. 2012. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6344713>.

7. Liu Huakun, Xie Xiaorong, He Jingbo, Xu Tao, Yu Zhao, Wang Chao, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2017;32(6):4708-4720. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2682197>.

8. Cheng Yi, Azizpanah-Abarghoee R., Azizi S., Ding Lei, Terzija Vladimir. Smart frequency control in low inertia energy systems based on frequency response techniques: a review. *Applied Energy*. 2020;279:115798. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115798>.

9. Mahadevan N., Dubey A., Guo Huangcheng, Karsai G. Using temporal causal models to isolate failures in power system protection devices. *IEEE Instrumentation Measurement and measurement log*. 2014;18(4):28-39. <https://doi.org/10.1109/AUTEST.2014.6935156>.

10. Johnson S. C, Rhodes J. D, Webber M. E. Under-

standing the impact of nonsynchronous wind and solar generation on grid stability and identifying mitigation pathways. *Applied Energy*. 2020;262:114492. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114492>.

11. Seneviratne C., Ozansoy C. Frequency response due to a large generator loss with the increasing penetration of wind/PV generation – a literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;57:659-668. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.051>.

12. Razzhivin I., Askarov A., Rudnik V., Suvorov A. A Hybrid simulation of converter-interfaced generation as the part of a large-scale power system model. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*. 2021;11(4):278-293. <https://doi.org/10.46604/ijeti.2021.7276>.

13. Arani M. F. M., El-Saadany E. F. Implementing virtual Inertia in DFIG-Based wind power generation. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2013;28(2):1373-1384. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2207972>.

14. Zhong Cheng, Zhou Yang, Yan Gangui. Power reserve control with real-time iterative estimation for PV system participation in frequency regulation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021;124:106367. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106367>.

15. Nguyen Ha Thi, Yang Guangya, Nielsen Arne Hejde, Jensen P. H. Frequency stability enhancement for low inertia systems using synthetic inertia of wind power. In: *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2017. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2017.8274566>.

16. Qi Hu, Lijun Fu, Fan Ma, Feng Ji. Large signal synchronizing Instability of PLL-based VSC connected to weak AC grid. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019;34(4):3220-3229. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2892224>.

17. Wang Yi Fei, Li Yun Wei. Analysis and digital implementation of cascaded delayed-signal-cancellation PLL. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2011;26(4):1067-1080. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2091150>.

18. Zhou Jenny Z., Ding Hui, Fan Shengtao, Zhang Yi, Gole A. M. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2014;29(5):2287-2296. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2330518>.

19. Magnus D. M., Scharlau C. C., Pfitscher L. L., Costa G. C., Silva G. M. A novel approach for robust control design of hidden synthetic inertia for variable speed wind turbines. *Electric Power Systems Research*. 2021;196:107267. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107267>.

20. Gutierrez F., Riquelme E., Barbosa K. A., Chávez H. State estimation for synthetic inertia control system using Kalman filter. *IEEE International Conference*

on Automation/24th Congress of the Chilean Association of Automatic Control. 2021. <https://doi.org/10.1109/ICAACCA51523.2021.9465316>.

21. Nguyen Ha Thi, Chleirigh M. N., Yang Guangya. A technical economic evaluation of inertial response from wind generators and synchronous condensers. *IEEE Access*. 2021;9:7183-7192. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3049197>.

22. Mohammad D, Mokhlis H., Mekhilef S. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;69:144-155. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.170>.

23. Bevrani H., Ise T., Miura Y. Virtual synchronous generators: a survey and new perspectives. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2014;54:244-254. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.07.009>.

24. Zarina P. P., Mishra S., Sekhar P. C. Exploring frequency control capability of a PV system in a hybrid PV-rotating machine-without storage system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2014;60:258-267. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.02.033>.

25. Karami N., Moubayed N., Outbib R. General review and classification of different MPPT techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;68-1:1-18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.132>.

26. Tielens P. Operation and control of power systems with low synchronous inertia. 2017. Available from: <https://core.ac.uk/download/pdf/95687043.pdf> [Accessed 18th September 2021].

27. Fan Lingling. Modeling Type-4 wind in weak grids. *IEEE Transactions on sustainable energy*. 2019;10(2):853-864. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2849849>.

28. Zhang Shuang, Jiao Long, Zhang Hui, Shi LinJun, Yang HuiBiao. A new control strategy of active participation in frequency regulation of photovoltaic system. In: *IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration*. 30 October – 1 November 2020, Wuhan. Wuhan: IEEE; 2020, p. 2314-2318. <https://doi.org/10.1109/EI250167.2020.9347015>.

29. Shi Qiaoming, Wang Gang, Ma Weiming, Fu Lijun, Wu You, Xing Pengxiang. Coordinated virtual inertia control strategy for D-PMSG considering frequency regulation ability. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2016;11(6):1556-1570. <https://doi.org/10.5370/JEET.2016.11.6.1556>.

30. Sun Yin, De Jong E. C. W., Wang Xiongfei, Yang Dongsheng, Blaabjerg Frede, Cuk V., et al. The Impact of PLL dynamics on the low inertia power grid: a case study of Bonaire island power system. *Energies*. 2019;12(7):1259. <https://doi.org/10.3390/en12071259>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рудник Владимир Евгеньевич,
инженер-исследователь научно-исследовательской
Лаборатории моделирования
электроэнергетических систем,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия

Суворов Алексей Александрович,
кандидат технических наук,
доцент Отделения электроэнергетики
и электротехники,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия

Рубан Николай Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент Отделения электроэнергетики
и электротехники,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия

Андреев Михаил Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий научно-исследовательской
Лабораторией моделирования
электроэнергетических систем,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия

Бай Юлий Дмитриевич,
ассистент Отделения электроэнергетики
и электротехники,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 11.03.2022; одобрена после рецензирования 29.07.2022; принята к публикации 18.08.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir E. Rudnik,
Research Engineer of the Research Laboratory
of Electric Power System Modeling,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin pr., Tomsk 634050, Russia

Aleksey A. Suvorov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the School
of Energy and Power Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin pr., Tomsk 634050, Russia

Nikolai Yu. Ruban,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the School
of Energy and Power Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia

Mikhail V. Andreev,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Research Laboratory
of Electric Power System Modeling,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin pr., Tomsk 634050, Russia

Yuly D. Bay,
Assistant Professor of the School
of Energy and Power Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin pr., Tomsk 634050, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 11.03.2022; approved after reviewing 29.07.2022; accepted for publication 18.08.2022.



Научная статья

УДК 621.311

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-487-498>

Повышение точности прогноза электропотребления промышленного предприятия методами машинного обучения с помощью отбора значимых признаков из временного ряда

Никита Николаевич Сергеев^{1✉}, Павел Викторович Матренин²^{1,2}Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия¹veegresatikin3102@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1534-9072>²matrenin.2012@corp.nstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>

Резюме. Цель – повышение точности прогнозирования электропотребления предприятия за счет анализа и предварительной обработки входных данных, а также оценка влияния выбора признаков на результаты различных моделей прогнозирования. В качестве объекта, для которого составляется прогноз, было выбрано деревообрабатывающее предприятие Нижнего Новгорода. В работе сравниваются два типа методов машинного обучения: нейросетевые и ансамблевые модели. Рассмотрен один из способов выделения наиболее значимых параметров (признаков) временного ряда для улучшения результата следующих ансамблевых моделей на базе деревьев решений: адаптивный бустинг (AdaBoost), градиентный бустинг (Gradient Boosting) и случайный лес (Random Forest). Определение наиболее важных признаков исходного временного ряда осуществлено с помощью расчета коэффициентов корреляции между электропотреблением в прогнозируемый час и в предшествующие часы. Установлено, что в рассматриваемом объекте для построения прогноза наиболее важными признаками являются значения потребляемой энергии в те часы, которые отстают от прогнозируемого часа на кратное число суток. В качестве дополнительного признака используется график планово-профилактических работ деревообрабатывающих станков. Результаты показали, что при выборе правильной методики отбора признаков ансамбли деревьев решений способны превосходить искусственные нейронные сети по результатам: наименьшая средняя ошибка нейросетевой модели на тестовой выборке составляет 7,0%, в то время как для одной ансамблевой модели (градиентного бустинга) получено значение ошибки в 5,5%. Показано, что использование графика ремонтных работ также повышает точность прогноза: для рассмотренных ансамблевых моделей снижение ошибки составило от 20 до 30%.

Ключевые слова: анализ временных рядов, прогнозирование электропотребления, промышленное предприятие, машинное обучение, искусственные нейронные сети, ансамбли деревьев решений

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00181).

Для цитирования: Сергеев Н. Н., Матренин П. В. Повышение точности прогноза электропотребления промышленного предприятия методами машинного обучения с помощью отбора значимых признаков из временного ряда // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 487–498. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-487-498>.

ENERGY INDUSTRY

Original article

Increasing the accuracy of forecasting the electricity consumption of an industrial enterprise by machine learning methods using the selection of significant features from a time series

Nikita N. Sergeev^{1✉}, Pavel V. Matrenin²^{1,2}Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia¹veegresatikin3102@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1534-9072>²matrenin.2012@corp.nstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>

Abstract. This study aims to improve the accuracy of forecasting the electricity consumption of an enterprise based on an analysis and preliminary processing of input data, as well as at evaluating the effect caused by feature selection on the results of various forecast models. A woodworking enterprise located in Nizhny Novgorod was selected as a forecast object. Two types of machine learning methods, including neural network and ensemble models, were compared. An approach to selecting the most significant parameters (features) from a time series was considered in order to improve the results of the following ensemble models based on decision trees: adaptive busting (AdaBoost), Gradient Boosting and Random Forest. The most significant features of the initial time series were determined using the calculation of correlation coefficients between the values of electricity consumption in forecasted and previous hours. For the considered forecast object, the most significant features were established to be the consumed energy in hours lagging behind the forecasted hour by the multiple number of days. The schedule of repair works for woodworking machines was used as an additional feature. According to the obtained results, decision tree ensembles can surpass artificial neural networks provided that significant features are selected correctly. Thus, the smallest average error of a neural network model on a test sample comprised 7.0%, while an error of 5.5% was obtained for a Gradient Boosting ensemble model. The use of a repair schedule was demonstrated to additionally increase the forecast accuracy: for the considered ensemble models, the error reduced from 20 to 30%.

Keywords: time series analysis, electric power consumption forecasting, industrial enterprise, machine learning, artificial neural networks, decision tree ensembles

Funding: The research was funded by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 22-79-00181).

For citation: Sergeev N. N., Matrenin P. V. Increasing the accuracy of forecasting the electricity consumption of an industrial enterprise by machine learning methods using the selection of significant features from a time series. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):487-498. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-487-498>.

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование электрической нагрузки потребителей представляет собой важную задачу, решение которой необходимо прежде всего системному оператору для эффективного управления электроэнергетической системой.

Конкретные цели прогнозирования во многом определяются временным горизонтом прогноза [1]:

- краткосрочные прогнозы составляются на несколько часов или несколько дней вперед и в основном используются для регулирования энергетического баланса, а также при формировании ценовых заявок поставщиков и покупателей электрической энергии;

- среднесрочные прогнозы строятся на срок от одного месяца до одного года вперед и применяются для решений по техническому обслуживанию оборудования и сетей, определения цены на электроэнергию, заключения сделок по передаче электроэнергии и т. д.;

- долгосрочные прогнозы строятся на несколько лет вперед и обычно используются для оценки будущего спроса на электроэнергию, анализа необходимости сооружения новых линий электропередачи и др.

Участники оптового рынка электроэнергии и мощности особенно заинтересованы в высоком качестве краткосрочных прогнозов, по-

скольку вместе с оплатой электроэнергии по ценам оптового рынка необходимо оплачивать штрафы за отклонения от ценовых заявок на покупку электроэнергии [2]. Это говорит о необходимости поиска новых методов прогнозирования графиков нагрузки и совершенствовании существующих.

Прогнозирование графиков нагрузки включает в себя задачу анализа временных рядов. Современные методы прогнозирования можно разделить на классические статистические методы и методы машинного обучения. Первая группа включает в себя различные регрессионные, авторегрессионные и гибридные модели, например авторегрессии со скользящим средним ARMA/ARIMA [1, 3–6]. Эти методы сталкиваются с трудностями на практике в случае сильностохастического, вероятностного характера изменений нагрузки энергосистемы и отсутствия строгой периодичности.

К методам машинного обучения относят методы опорных векторов [5–8], решающие деревья [9, 10], ансамблевые методы [11, 12] и искусственные нейронные сети (ИНС) [6, 12–14]. Эффективность таких методов существенно зависит от объема, вида и информативности данных, на которых обучаются модели. Необходимость обучения моделей является главной особенностью и в то же время главным недостатком методов машинного

обучения. Для получения качественных результатов требуется большая выборка данных для обучения, и при этом данные должны быть достоверными и репрезентативными.

Отдельно следует выделить ИНС как наиболее сложные и разнообразные на данный момент алгоритмы машинного обучения. По своей сути нейронные сети являются нелинейными статистическими моделями. Существует множество различных архитектур нейронных сетей, каждая из которых имеет свои особенности и предназначена для решения определенного набора задач. Широкое применение для прогнозирования графиков электропотребления нашли нейронные сети прямого распространения (Feedforward Neural Network) [13], сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Network, CNN) [14] и рекуррентные нейронные сети (Recurrent Neural Network, RNN) [6, 12].

ИНС имеют ряд преимуществ, благодаря которым они могут быть успешно применены в различных задачах и ситуациях:

– могут обучаться и моделировать сложные нелинейные зависимости;

– умеют выполнять обобщение (после завершения обучения и определения зависимостей в исходном наборе данных они могут применять изученные зависимости и делать предсказания на новом наборе данных);

– не требуют строгих ограничений к входным величинам (например, к их распределению), как правило, единственное требование к данным – принадлежность значений отрезку $[0; 1]$ или $[-1; 1]$, что можно получить достаточно просто с помощью нормализации числовых признаков и кодирования категориальных;

– способны выполнять несколько задач параллельно без ущерба производительности системы.

Отбор признаков представляет собой процесс получения подвыборки признаков, удовлетворяющих определенным критериям, из исходной выборки [15–17]; к таким критериям относятся коэффициент корреляции, евклидово расстояние, мера информации. Это позволяет исключить не имеющие значения данные, то есть уменьшить размер-

ность массива данных для обучения. При этом появляется возможность упростить модель, а также повысить ее точность и скорость обучения.

В большинстве исследований в области прогнозирования электропотребления с помощью машинного обучения используется стандартный набор признаков для обучения моделей: предыдущее электропотребление, порядковый номер дня в неделе, час суток, признак выходного (праздничного) дня, температура, количество осадков, облачность и т. д. Новизна данной работы заключается, в частности, в применении графика ремонтных работ для построения прогнозов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Постановка задачи выглядит следующим образом: дана выборка входных данных (X, T, H, R) ; необходимо создать модель, которая на основе этих данных строит прогноз электропотребления на 24 часа вперед:

$$\hat{y} = f(X, T, H, R); \quad (1)$$

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{24m}\}; \quad (2)$$

$$R = \{0, 1\}; \quad (3)$$

$$H = \{0, 1\}; \quad (4)$$

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_5\}, \quad (5)$$

где X – множество параметров, соответствующих ретроспективному почасовому потреблению мощности; x_1, x_2, \dots, x_{24m} – данные почасового электропотребления за m предыдущих суток, кВт; H – бинарная переменная, принимающая значение 1, если рассматриваемый час приходится на выходной или праздничный день, и 0 в обратном случае; R – бинарная переменная, принимающая значение 1, если рассматриваемый час попадает в период ремонтных работ, и 0 в обратном случае; T – множество параметров, соответствующих информации о време-

ни начала прогноза; t_1, t_2, \dots, t_5 – час суток, день недели, число, месяц и год часа, соответствующий началу прогноза; \hat{y} – прогноз электропотребления на сутки вперед.

В качестве метрик качества модели были выбраны средний модуль ошибки (MAE от англ. Mean Absolute Error) и средний модуль процентной ошибки (MAPE от англ. Mean Absolute Percentage Error):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|; \quad (6)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\%, \quad (7)$$

где n – количество часов; \hat{y}_i – прогноз электропотребления в i -й час; y_i – фактическое значение электропотребления в i -й час.

Для решения поставленной задачи были рассмотрены два вида моделей машинного обучения: ансамбли деревьев решений и глубокая полносвязная нейронная сеть.

Основной подход к решению задач обучения по прецедентам заключается в поиске такого набора параметров алгоритма из заданного набора параметров A , который даст минимум средней ошибки алгоритма на всей выборке X^m :

$$a = \arg \min_{a \in A} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m l_i(a(x_i), y^*(x_i)), \quad (8)$$

где i – номер образца; $l_i(a(x_i), y^*(x_i))$ – функция потерь, показывающая, насколько отклоняется ответ алгоритма $\hat{y}_i = a(x_i)$ от правильного ответа $y_i = y^*(x_i)$ на произвольном объекте $x \in X$. При этом вид функции потерь зависит от типа решаемой задачи. Поставленная задача представляет собой задачу регрессии, и в ходе исследования были рассмотрены следующие функции потерь:

– среднеквадратичная функция потерь (Mean Squared Error Loss, MSE), где

$$l_i(y_i, \hat{y}_i) = (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (9)$$

– средняя по модулю функция потерь (Mean Absolute Error Loss, MAE), где

$$l_i(y_i, \hat{y}_i) = |y_i - \hat{y}_i|, \quad (10)$$

– функция потерь Хьюбера (Huber Loss) [18], где

$$l_i(y_i, \hat{y}_i) = \begin{cases} \frac{1}{2}(y_i - \hat{y}_i)^2 & \text{для } |y_i - \hat{y}_i| \leq \delta, \\ \delta \left(|y_i - \hat{y}_i| - \frac{1}{2}\delta \right) & \text{иначе.} \end{cases} \quad (11)$$

В ходе работы было установлено, что в данной задаче наилучшие результаты при построении ансамблей деревьев решений получаются при использовании среднеквадратичной функции потерь (9), а при создании нейронной сети – средней по модулю функции потерь (10).

В работе были использованы следующие подходы к построению ансамблевых моделей: адаптивный бустинг над решающими деревьями (AdaBoost, AB), градиентный бустинг над решающими деревьями (Gradient Boosting, GB) и случайный лес (Random Forest, RF) [19].

Выбор ансамблевых методов обусловлен наличием бинарных признаков H и R , учитывающих выходные дни и проведение ремонтных работ в определенные моменты времени, соответственно. Перечисленные ансамблевые методы в качестве базовых алгоритмов используют решающие деревья, в которых для решения поставленной задачи составляется набор простых логических правил. Это позволяет им эффективно учитывать признаки, не являющиеся количественными.

Принципиально случайный лес отличается от остальных перечисленных методов типом используемого ансамбля. В случайном лесе для обучения применяется бэггинг, в котором обучающая выборка разделяется на несколько случайных подвыборок, при этом один и тот же элемент может попадать в раз-

ные подвыборки. Каждый отдельный регрессор в этом случае обучается независимо от остальных, и ответы всех решающих деревьев обобщаются и усредняются. Итоговая композиция строится как среднее всех N базовых алгоритмов $b_1(x), \dots, b_n(x)$, каждый из которых обучен на подвыборке X_1, \dots, X_N , соответственно:

$$a_N(x) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N b_n(x). \quad (12)$$

В бустинге же решающие деревья строятся последовательно, каждый следующий регрессор зависит от результатов предыдущего и стремится исправить его ошибки. Окончательный ответ модели в этом случае определяется как средневзвешенная сумма базовых алгоритмов, для каждого из которого определяется коэффициент (вес) γ :

$$a_N(x) = \sum_{n=1}^N \gamma_n b_n(x). \quad (13)$$

Принципиальное отличие адаптивного бустинга от градиентного бустинга заключается в способе учета ошибок ансамбля. В адаптивном бустинге снижение ошибки достигается путем увеличения веса тех объектов обучающей выборки, на которых была допущена ошибка. В градиентном бустинге снижение ошибки ансамбля достигается с помощью градиентного спуска – каждый шаг делается вдоль направления наискорейшего убывания ошибки, и каждый регрессор строится так, чтобы получить максимальное снижение ошибки модели.

Стоит отметить, что использование всех доступных данных для обучения модели не всегда целесообразно, а в некоторых случаях это даже может негативно сказаться на качестве модели. Поэтому отбор наиболее информативных признаков при работе с такими моделями особенно важен.

В общем случае структуру любой нейронной сети можно представить в виде набора связанных между собой входного, скрытых и

выходного слоев.

Каждый нейрон скрытого слоя представляет собой вычислительную единицу, последовательно применяющую линейную функцию на входные переменные и нелинейную функцию активации на результат; i -й нейрон можно представить в виде уравнений как

$$\begin{aligned} z_i &= W^T x + b, \\ a_i &= g(z_i), \end{aligned} \quad (14)$$

где W – матрица весов (weights); x – вектор входных значений; b – свободный коэффициент (сдвиг, bias); g – нелинейная функция активации.

Существует множество видов функций активации: сигмоидная (Sigmoid), гиперболический тангенс, линейный выпрямитель (Rectified Linear Unit, ReLU), линейный выпрямитель «с утечкой» (Leaky ReLU) [20]. В данной модели применяются две такие функции: сигмоидная и ReLU.

Сигмоидная функция определяется как

$$g(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}. \quad (15)$$

Сигмоидная функция часто используется как функция активации последнего нейрона сети, поскольку она принимает значения из отрезка $(0; 1)$ и непрерывно дифференцируема на всей области определения, что очень важно для процесса обучения нейронной сети.

Уравнение ReLU имеет следующий вид:

$$g(z) = \max(0, z). \quad (16)$$

ReLU является наиболее распространенной на практике функцией активации нейронов скрытых слоев по нескольким причинам. Во-первых, эта функция проста с вычислительной точки зрения, что позволяет ускорить обучение нейронной сети. Во-вторых, ReLU в целом ведет себя как линейная функция активации; как правило, оптимизировать модель проще, когда ее вид близок к линейному. В-третьих, в отличие от сигмоид-

ной функции, не имеет недостатка в виде исчезающих градиентов: ее производная принимает постоянное значение на всей области определения.

В работе используется нейронная сеть прямого распространения (или глубокая нейронная сеть) с шестью скрытыми слоями. Подробно архитектура используемой сети приведена на рис. 1.

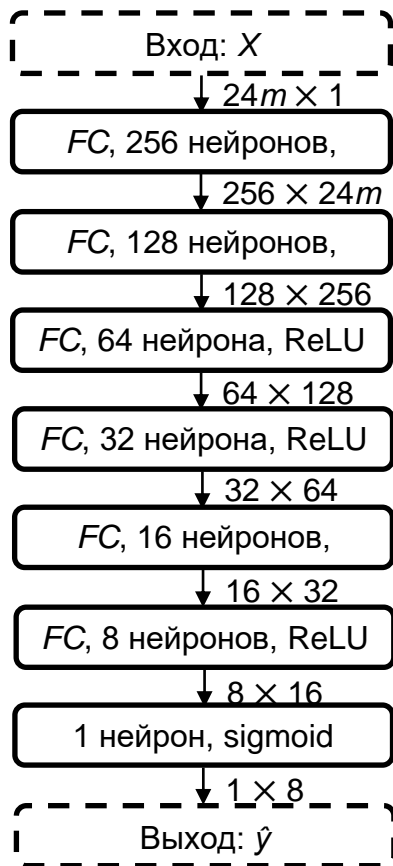


Рис. 1. Архитектура используемой нейронной сети (m – число суток, FC – полносвязный слой (fully connected), \hat{y} – предсказание модели)

Fig. 1. Architecture of the used neural network (m – number of days, FC – fully connected layer, \hat{y} – model prediction)

Минимум (или значение, близкое к минимуму) средней ошибки алгоритма на всей выборке $L(y, \hat{y})$ достигается путем оптимизации нейронной сети, то есть нахождением такой матрицы весов W , при которой значение $L(y, \hat{y})$ минимально. Для оптимизации нейронных сетей используется множество методов, но наиболее распространенным является метод обратного распространения

ошибки (Back-propagation) с двумя способами реализации: стохастический градиентный спуск (Stochastic Gradient Descent, SGD) и пакетный градиентный спуск (Batch Gradient Descent) [21].

SGD представляет собой самый тривиальный алгоритм оптимизации. Обновление параметров модели происходит после вычисления градиента функции потерь на каждом объекте и движения в противоположную сторону, т. е. в направлении наискорейшего убывания функции потерь:

$$W = W - \alpha dW, \quad (17)$$

где α – скорость обучения (learning rate) – коэффициент, задающий величину шага в направлении антиградиента – один из наиболее важных гиперпараметров модели, от которого зависит скорость сходимости алгоритма оптимизации; dW – матрица градиентов $dW = \partial L / \partial W$.

SGD обладает существенным недостатком: множество параметров нейронной сети в большинстве случаев расположено в многомерном пространстве, из-за чего функция потерь может быть намного сильнее чувствительна к изменениям в одном направлении и менее чувствительна к изменениям в другом. В результате появляются шумы, и процесс обучения замедляется.

Пакетный градиентный спуск вычисляет градиент на всех образцах вместе, что делает этот метод несколько стабильнее по сравнению с SGD, но в случае большого объема выборки данных каждая итерация может занимать слишком много времени, что, безусловно, приводит к снижению скорости обучения.

В качестве компромисса часто применяют мини-пакетный градиентный спуск (Mini-batch Gradient Descent) [22]. В этом случае обновление весов происходит после обработки заранее заданного количества образцов, что позволяет компенсировать недостатки двух других способов. В разработанной нейросетевой модели применяется данный способ для 32 объектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рассматриваемой задаче исходной информацией является почасовое потребление мощности промышленного деревообрабатывающего предприятия за 2 года (в период с 01.01.2019 по 31.12.2020), а также график планово-профилактических работ (ППР) деревообрабатывающих станков на этот период.

Для построения модели необходимо выделить наиболее значимые признаки из имеющейся выборки. С этой целью был рассчитан коэффициент корреляции между электропотреблением в прогнозируемый час и некоторыми признаками. На рис. 2 приведено изменение коэффициента корреляции Спирмена между электропотреблением в рассматриваемый час и в предыдущие часы за две недели.

Можно наблюдать возрастание коэффи-

циента корреляции между электропотреблением в текущий час и в часы, отстающие от текущего на кратное число суток (отмеченные точки на рис. 2); наибольшая корреляция наблюдается между текущим часом и часами, отстающими от текущего на 168 и 336 ч, то есть в семидневные интервалы. Таким образом, в технологическом процессе исследуемого предприятия отчетливо выделяются недельные циклы. Из этого можно сделать вывод, что для построения прогноза наиболее важными признаками являются значения потребляемой энергии в те часы, которые отстают от рассматриваемого на кратное число суток.

В табл. 1 приведены эмпирически подобранные гиперпараметры используемых в работе моделей. Исходная выборка была поделена на обучающую и тестовую в отношении 90 на 10.

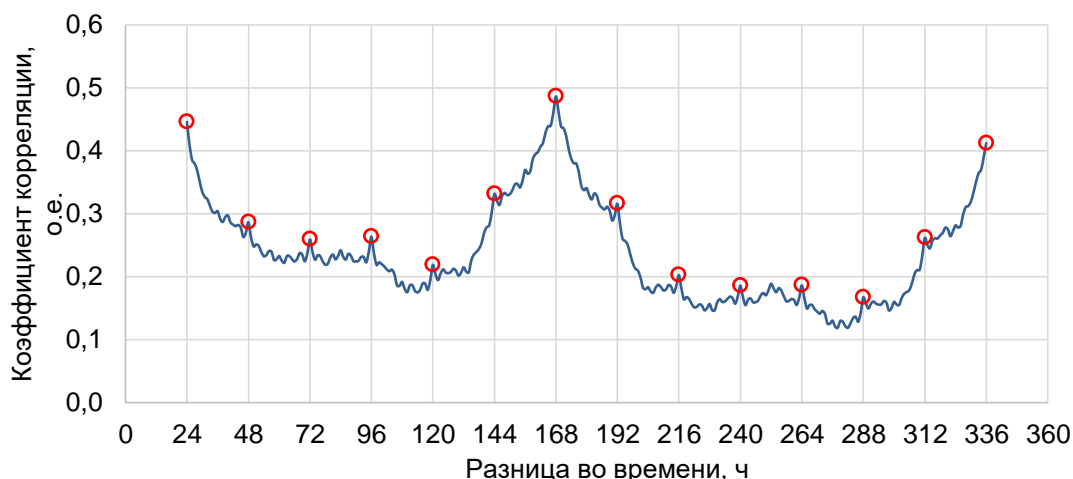


Рис. 2. Коэффициенты корреляции между электропотреблением в рассматриваемый час и в предыдущие часы
 Fig. 2. Coefficients of correlation between the power consumption in the considered hour and the preceding hours

Таблица 1. Гиперпараметры моделей
 Table 1. Model hyperparameters

Модель	Гиперпараметры
AdaBoost	максимальная глубина дерева – 8 размер ансамбля – 50
Gradient Boosting	максимальная глубина дерева – 5 размер ансамбля – 50
Random Forest	максимальная глубина дерева – 7 размер ансамбля – 30
Deep NN	количество скрытых слоев – 6 алгоритм оптимизации – adam коэффициент скорости обучения – 0,001 количество эпох – 100 число пакетов – 32

Для оценки влияния выбора признаков на точность прогноза ансамблевых моделей были рассмотрены 4 варианта исходных данных для обучения модели:

- 1) электропотребление за каждый час с учетом ремонтных работ;
- 2) электропотребление за каждый час без учета ремонтных работ;
- 3) электропотребление только за отобранные часы с учетом ремонтных работ;
- 4) электропотребление только за отобранные часы без учета ремонтных работ.

Для нейросетевой модели рассматривались только варианты 1 и 2, поскольку при обучении ИНС важно иметь как можно большую выборку данных [23].

Оценки точности моделей, обученных по каждому из перечисленных вариантов выбора признаков, приведены в табл. 2 и 3.

По полученным результатам можно видеть, что в ансамблевых моделях использование всего рассматриваемого временного ряда не дает существенного прироста точности по сравнению с использованием данных только по наиболее значимым часам, а в некоторых случаях может приводить и к сниже-

нию точности.

Учет графика ППР также позволяет заметно повысить точность прогноза. Так, для наилучшей по качеству модели Gradient Boosting снижение ошибки составило 1,4 процентных пункта (с 6,9 до 5,5) или 20%. На рис. 3 показаны истинный график электропотребления и графики прогноза электропотребления, полученные с помощью градиентного бустинга на тестовой выборке как с использованием данных по графику ППР, так и без них.

На рис. 3 приведен наглядный пример того, как учет ППР позволяет данной модели достигать высокой точности на участках низкого электропотребления, связанных с проведением крупных ремонтных работ. В то же время без этих данных модель на указанных промежутках сильнее отклоняется от истинного графика.

В нейросетевой модели использование графика ППР не привело к существенному снижению ошибки по сравнению с ансамблевыми моделями. Здесь снижение ошибки составило всего 0,5 процентных пункта, или 6,7%.

Таблица 2. Оценка точности моделей MAPE, %
Table 2. MAPE model accuracy metric, %

Модель	Используемые признаки			
	Все часы, с ППР	Все часы, без ППР	Отобранные часы, с ППР	Отобранные часы, без ППР
AdaBoost	6,2	8,1	6,3	7,6
Gradient Boosting	5,6	7,1	5,5	6,9
Random Forest	5,8	7,6	5,8	7,5
Deep NN	7,0	7,5	–	–

Таблица 3. Оценка точности моделей MAE, кВт
Table 3. MAE model accuracy metric, kW

Модель	Используемые признаки			
	Все часы, с ППР	Все часы, без ППР	Отобранные часы, с ППР	Отобранные часы, без ППР
AdaBoost	206,5	249,2	212,4	233,6
Gradient Boosting	180,5	209,7	179,1	205,6
Random Forest	190,9	223,1	189,5	219,9
Deep NN	196,5	207,6	–	–

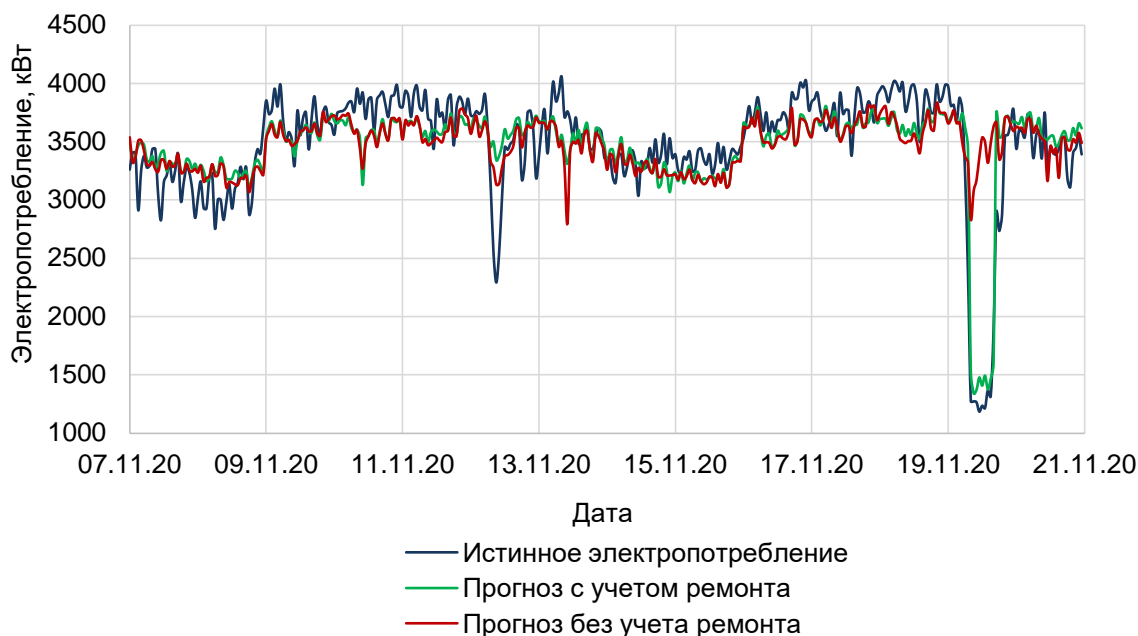


Рис. 3. Сопоставление истинного графика электропотребления и прогнозов
Fig. 3. Comparison of the true curve of power consumption and forecasts

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был выполнен сравнительный анализ ансамблевых и нейросетевых моделей машинного обучения в задаче прогнозирования электропотребления предприятий при различных подходах к отбору признаков. С помощью определения коэффициентов корреляции были определены наиболее значимые часы рассматриваемого временного ряда. Для сравнения были построены модели на нескольких вариантах исходных данных для обучения.

Было установлено, что использование только отобранных часов вместо всего временного ряда для построения прогноза с помощью ансамблевых моделей не приводит к снижению точности, а в отдельных случаях может ее и повышать. Кроме того, это также позволяет на порядок снизить длительность

обучения модели за счет понижения размерности рассматриваемого массива признаков.

Полученные результаты показывают, что использование графика ремонтных работ также повышает точность прогноза. Для рассмотренных ансамблевых моделей снижение ошибки составило от 20 до 30%.

Нейронная сеть в данном случае оказалась менее эффективной по сравнению с ансамблями деревьев решений: ниже точность в целом извлекает меньше информации из графика ППР, что можно связать с недостаточным объемом имеющейся выборки данных.

Таким образом, потенциал повышения точности прогнозирования лежит в использовании дополнительных данных о техпроцессе рассматриваемого предприятия и в выборе подходящих методов.

Список источников

1. Lozinskaia A., Redkina A., Shenkman E. Electricity consumption forecasting for integrated power system with seasonal patterns // Applied Econometrics. 2020. Vol. 60. P. 5–25. <https://doi.org/10.22394/1993-7601-2020-60-5-25>.
2. Филиппова Т. А., Русина А. Г., Дронова Ю. В. Модели и методы прогнозирования электроэнергии и мощности при управлении режимами электроэнергетических систем: монография. Новосибирск: Изд-во НГТУ,

2009. 368 с.
3. Hernandez L., Baladron C., Aguiar J. M., Carro B., Sanchez-Esguevillas A. J., Lloret J., et al. A survey on electric power demand forecasting: future trends in smart grids, microgrids and smart buildings // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. Vol. 16. Iss. 3. P. 1460–1495. <https://doi.org/10.1109/SURV.2014.032014.00094>.
4. Deb Chirag, Zhang Fan, Yang Junjing, Lee Siew Eang, Shah Kwok Wei. A review on time series forecasting tech-

- niques for building energy consumption // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 74. P. 902–924. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.085>.
5. Hahn Heiko, Meyer-Nieberg Silja, Pickl Stefan. Electric load forecasting methods: tools for decision making // *European Journal of Operational Research*. 2009. Vol. 199. Iss. 3. P. 902–907. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.062>.
6. Cai M., Pipattanasomporn M., Rahman S. Day-ahead building-level load forecasts using deep learning vs. traditional time-series techniques // *Applied Energy*. 2019. Vol. 236. P. 1078–1088. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.042>.
7. Qiu Xueheng, Zhang Le, Ren Ye, Suganthan P. N., Amaratunga G. Ensemble deep learning for regression and time series forecasting // *IEEE Symposium on Computational Intelligence in Ensemble Learning*. 2014. <https://doi.org/10.1109/CIEL.2014.7015739>.
8. Поляхов Н. Д., Приходько И. А., Ван Ефэн. Прогнозирование электропотребления на основе метода опорных векторов // *Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета*. 2014. № 10. С. 26–30.
9. Yildiz B., Bilbao J. I., Sproul A. B. A review and analysis of regression and machine learning models on commercial building electricity load forecasting // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 73. P. 1104–1122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.023>.
10. Yang Jingfei, Stenzel J. Short-term load forecasting with increment regression tree // *Electric Power Systems Research*. 2006. Vol. 76. Iss. 9-10. P. 880–888. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2005.11.007>.
11. Matrenin P., Safaraliev M., Dmitriev S., Kokin S., Ghulomzoda A., Mitrofanov S. Medium-term load forecasting in isolated power systems based on ensemble machine learning models // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 612–618. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.175>.
12. Matrenin P., Antonenkov D., Manusov V. Recurrent and ensemble models for short-term load forecasting of coal mining companies // *Ural-Siberian Smart Energy Conference*. 2021. <https://doi.org/10.1109/USSEC53120.2021.9655732>.
13. Neupane B., Perera K. S., Aung Zeyar, Woon Wei Lee. Artificial neural network-based electricity price forecasting for smart grid deployment // *IEEE International Conference on Computer Systems and Industrial Informatics*. 2012. <https://doi.org/10.1109/ICCSII.2012.6454392>.
14. Amarasinghe K., Marino D. L., Manic M. Deep neural networks for energy load forecasting // *IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (Edinburgh, 19–21 June 2017)*. Edinburgh: IEEE, 2017. P. 1483–1488. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001465>.
15. Jie Cai, Jiawei Luo, Shulin Wang, Sheng Yang. Feature selection in machine learning: a new perspective // *Neurocomputing*. 2018. Vol. 300. P. 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.11.077>.
16. Koprinska I., Rana M., Agelidis V. G. Correlation and instance based feature selection for electricity load forecasting // *Knowledge-Based Systems*. 2015. Vol. 82. P. 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.02.017>.
17. Bouktif S., Fiaz A., Ouni A., Serhani M. A. Optimal deep learning LSTM model for electric load forecasting using feature selection and genetic algorithm: comparison with machine learning approaches // *Energies*. 2018. Vol. 11. Iss. 7. P. 1636. <https://doi.org/10.3390/en11071636>.
18. Huber P. J. Robust estimation of a location parameter // *The Annals of Mathematical Statistics*. 1964. Vol. 35. Iss. 1. P. 73–101. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177703732>.
19. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., et al. Scikit-learn: machine learning in Python // *Journal of Machine Learning Research*. 2011. Vol. 12. Iss. 85. P. 2825–2830.
20. Ramachandran P., Zoph B., Le Quoc V. Searching for activation functions. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.05941>.
21. Hoffer E., Hubara I., Soudry D. Train longer, generalize better: closing the generalization gap in large batch training of neural networks. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.08741>. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.08741>.
22. Khirirat S., Feyzmahdavian H. R., Johansson M. Mini-batch gradient descent: faster convergence under data sparsity // *IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (Melbourne, 12–15 December 2017)*. Melbourne: IEEE, 2017. P. 2880–2887. <https://doi.org/10.1109/CDC.2017.8264077>.
23. Linjordet T., Balog K. Impact of training dataset size on neural answer selection models // *Advances in Information Retrieval. Lecture Notes in Computer Science / eds. L. Azzopardi, B. Stein, N. Fuhr, P. Mayr, C. Hauff, D. Hiemstra*. Vol. 11437. Cham: Springer, 2019. P. 828–835. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15712-8_59.

References

1. Lozinskaia A., Redkina A., Shenkman E. Electricity consumption forecasting for integrated power system with seasonal patterns. *Applied Econometrics*. 2020;60:5-25. <https://doi.org/10.22394/1993-7601-2020-60-5-25>.
2. Filippova T. A., Rusina A. G., Dronova Yu. V. *Models and methods of electric energy and power forecasting in power system operation management: monograph*. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2009, 368 p. (In Russ.).
3. Hernandez L., Baladron C., Aguiar J. M., Carro B., Sanchez-Esguevillas A. J., Lloret J., et al. A survey on electric power demand forecasting: future trends in smart grids, microgrids and smart buildings. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2014;16(3):1460-1495. <https://doi.org/10.1109/SURV.2014.032014.00094>.
4. Deb Chirag, Zhang Fan, Yang Junjing, Lee Siew Eang, Shah Kwok Wei. A review on time series forecasting techniques for building energy consumption. *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*. 2017;74:902-924. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.085>.
5. Hahn Heiko, Meyer-Nieberg Silja, Pickl Stefan. Electric load forecasting methods: tools for decision making. *European Journal of Operational Research*. 2009;199(3):902-907. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.062>.
6. Cai M., Pipattanasomporn M., Rahman S. Day-ahead building-level load forecasts using deep learning vs traditional time-series techniques. *Applied Energy*. 2019;236:1078-1088. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.042>.
7. Qiu Xueheng, Zhang Le, Ren Ye, Suganthan P. N., Amaratunga G. Ensemble deep learning for regression and time series forecasting. In: *IEEE Symposium on Computational Intelligence in Ensemble Learning*. 2014. <https://doi.org/10.1109/CIEL.2014.7015739>.
8. Polyakhov N. D., Prikhodko I. A., Efen Van. Electric load forecasting based on support vector machine optimized. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo elektrotekhnicheskogo universiteta*. 2014;10:26-30. (In Russ.).
9. Yildiz B., Bilbao J. I., Sproul A. B. A review and analysis of regression and machine learning models on commercial building electricity load forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;73:1104-1122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.023>.
10. Yang Jingfei, Stenzel J. Short-term load forecasting with increment regression tree. *Electric Power Systems Research*. 2006;76(9-10):880-888. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2005.11.007>.
11. Matrenin P., Safaraliev M., Dmitriev S., Kokin S., Ghulomzoda A., Mitrofanov S. Medium-term load forecasting in isolated power systems based on ensemble machine learning models. *Energy Reports*. 2022;8:612-618. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.175>.
12. Matrenin P., Antonenkov D., Manusov V. Recurrent and ensemble models for short-term load forecasting of coal mining companies. In: *Ural-Siberian Smart Energy Conference*. 2021. <https://doi.org/10.1109/USSEC53120.2021.9655732>.
13. Neupane B., Perera K. S., Aung Zeyar, Woon Wei Lee. Artificial neural network-based electricity price forecasting for smart grid deployment. In: *IEEE International Conference on Computer Systems and Industrial Informatics*. 2012. <https://doi.org/10.1109/ICCSII.2012.6454392>.
14. Amarasinghe K., Marino D. L., Manic M. Deep neural networks for energy load forecasting. In: *IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics*. 19–21 June 2017, Edinburgh. Edinburgh: IEEE; 2017, p. 1483-1488. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001465>.
15. Jie Cai, Jiawei Luo, Shulin Wang, Sheng Yang. Feature selection in machine learning: a new perspective. *Neurocomputing*. 2018;300:70-79. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.11.077>.
16. Koprinska I., Rana M., Agelidis V. G. Correlation and instance based feature selection for electricity load forecasting. *Knowledge-Based Systems*. 2015;82:29-40. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.02.017>.
17. Bouktif S., Fiaz A., Ouni A., Serhani M. A. Optimal deep learning LSTM model for electric load forecasting using feature selection and genetic algorithm: comparison with machine learning approaches. *Energies*. 2018;11(7):1636. <https://doi.org/10.3390/en11071636>.
18. Huber P. J. Robust estimation of a location parameter. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1964;35(1):73-101. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177703732>.
19. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., et al. Scikit-learn: machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*. 2011;12(85):2825-2830.
20. Ramachandran P., Zoph B., Le Quoc V. Searching for activation functions. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.05941>.
21. Hoffer E., Hubara I., Soudry D. Train longer, generalize better: closing the generalization gap in large batch training of neural networks. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.08741>.
22. Khirirat S., Feyzmahdavian H. R., Johansson M. Mini-batch gradient descent: faster convergence under data sparsity. In: *IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control*. 12–15 December 2017, Melbourne. Melbourne: IEEE; 2017, p. 2880-2887. <https://doi.org/10.1109/CDC.2017.8264077>.
23. Linjordet T., Balog K. Impact of training dataset size on neural answer selection models. In: Azzopardi L., Stein B., Fuhr N., Mayr P., Hauff C., Hiemstra D. (eds.). *Advances in Information Retrieval. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 11437. Cham: Springer; 2019, p. 828-835. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15712-8_59.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергеев Никита Николаевич,
лаборант
межкафедральной Научно-исследовательской
лаборатории обработки, анализа и представления
данных в электроэнергетических системах,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikita N. Sergeev,
Laboratory Assistant
Interdepartmental Research Laboratory
for Processing, Analysis and Presentation of Data in
Power Systems,
Novosibirsk State Technical University,
20, K. Marks pr., Novosibirsk 630073, Russia

Матренин Павел Викторович,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
межкафедральной Научно-исследовательской
лаборатории обработки, анализа и представления
данных в электроэнергетических системах,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия

Pavel V. Matrenin,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher
Interdepartmental Research Laboratory
for Processing, Analysis and Presentation of Data in
Power Systems,
Novosibirsk State Technical University,
20, K. Marks pr., Novosibirsk 630073, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 23.06.2022; одобрена после рецензирования 05.08.2022; принята к публикации 21.09.2022.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 23.06.2022; approved after reviewing 05.08.2022; accepted for publication 21.09.2022.



Научная статья

УДК 620.97

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-499-507>

Анализ влияния подогрева воздуха перед компрессором газотурбинной установки на технико-экономические показатели работы блока ПГУ-450

Михаил Александрович Скиданов^{1✉}, Владимир Владимирович Папин²,
Роман Владимирович Безуглов³, Евгений Михайлович Дьяконов⁴,
Николай Николаевич Ефимов⁵, Владимир Романович Филимонов⁶

¹«Уренгойская ГРЭС», филиал АО «Интер РАО – Электрогенерация», г. Новый Уренгой, Россия

²⁻⁶Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)

им. М. И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

¹skidanov_ma@interra.ru

²vladimir_papin@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3277-9413>

³bezuglov@npi-tu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7142-5207>

⁴emdyakonov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0289-2976>

⁵efimovnn40@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5010-6773>

⁶vladimir.filimonoff2016@yandex.ru

Резюме. Цель – произвести анализ влияния подогрева воздуха перед компрессором газотурбинной установки при использовании штатной системы замкнутого контура подогрева воздуха с подводом тепла от тепловой сети Уренгойской городской районной электрической станции на экономичность работы блока ПГУ-450 и данной электростанции в целом. В работе использовался сравнительный анализ данных, полученных в результате сравнения имеющихся заводских характеристик газовых турбин ГТЭ-160 (SGT5-2000E), принятых режимов работы систем подогрева воздуха (замкнутый контур подогрева воздуха и антиобледенительная система) и результатов влияния работы указанных систем на удельный расход топлива блока ПГУ-450 и Уренгойской электростанции по данным ежедневных расчетов технико-экономических параметров работы энергоустановок. В результате проведенных натурных испытаний системы подогрева воздуха при номинальной нагрузке энергоблока ПГУ-450 установлено, что оптимальная температура составила +6,4°C; при подогреве воздуха с -5,0°C до +6,4°C удельный расход условного топлива на 1 кВт·ч электроэнергии снизился на 1,4 г; приведенное значение снижения удельного расхода условного топлива на отпуск электрической энергии на оборудовании пускорезервной теплоэлектроцентрали при увеличении коэффициента теплофикации составило 2,43 г, а для электростанции в целом – 2,35 г. Таким образом, использование замкнутого контура подогрева воздуха с нагревом сетевой воды без использования приводит к положительному эффекту тепловой экономичности. Подогрев воздуха перед компрессором газовой турбины приводит к увеличению ее КПД на 0,3%, дальнейшее повышение сверх оптимальной температуры приводит к снижению располагаемой мощности парогазовой установки на 3,1 МВт на каждый 1 градус.

Ключевые слова: пиковый сетевой подогреватель, коэффициент использования тепла топлива, подогрев воздуха на всасе газотурбины, газотурбинная установка с добавлением в топливо водорода

Финансирование: Статья подготовлена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2021–2023 гг. (Проект № СП-1061.2021.1).

Для цитирования: Скиданов М. А., Папин В. В., Безуглов Р. В., Дьяконов Е. М., Ефимов Н. Н., Филимонов В. Р. Анализ влияния подогрева воздуха перед компрессором газотурбинной установки на технико-экономические показатели работы блока ПГУ-450 // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 499–507. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-499-507>.

Original article

An analysis of the effect of gas turbine compressor air preheating on the technical and economic indicators of a PGU-450 unit

Mihail A. Skidanov^{1✉}, Vladimir V. Papin², Roman V. Bezuglov³,
Evgeny M. Dyakonov⁴, Nikolay N. Efimov⁵, Vladimir R. Filimonov⁶

¹Urengoyanskaya GRES, branch of JSC Inter RAO – Electric Power Plants, Novy Urengoy, Russia

²⁻⁶Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia

¹skidanov_ma@interra.ru

²vladimir_papin@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3277-9413>

³bezuglov@npi-tu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7142-5207>

⁴emdyakonov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0289-2976>

⁵efimovnn40@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5010-6773>

⁶vladimir.filimonoff2016@yandex.ru

Abstract. We study the effect of preheating the air entering a gas turbine compressor using a standard closed air heating circuit system with heat supply from the heat network of the Urengoy city district power plant on the efficiency of a PGU-450 unit and this power plant as a whole. An analysis was conducted to compare the data obtained as a result of assessing the existing plant characteristics of GTE-160 gas turbines (SGT5-2000E), the adopted operating modes of air heating systems (closed air heating circuit and anti-icing system) and the effect of the operation of these systems on the specific fuel consumption of a PGU-450 unit and the Urengoy city district power plant according to the daily calculated technical and economic parameters of the power unit operation. As a result of full-scale tests carried out with the air heating system at the nominal load of a PGU-450 power unit, the optimal temperature was established to be +6.4°C. During the air heating from -5.0°C to +6.4°C, the specific consumption of the conventional fuel per 1 kWh of electricity decreased by 1.4 g. The reduced specific consumption of the conventional fuel for the supply of electric energy at an increase in the extraction ratio comprised 2.43 and 2.35 g for the equipment of the backup thermal power station and the power plant as a whole, respectively. Thus, the use of a closed air heating circuit with the unutilized network water heating leads to a positive thermal efficiency effect. The preheating of the air entering the gas turbine compressor leads to an increase in its efficiency by 0.3%. A further increase in excess of the optimum temperature leads to a decrease in the available capacity of the combined cycle plant by 3.1 MW per each degree.

Keywords: peak network heater, fuel utilization efficiency factor, gas turbine intake air heating, gas turbine with hydrogen fuel enhancement

Funding: The article was prepared with the support of a scholarship from the President of the Russian Federation to young scientists and graduate students carrying out promising research and development in priority areas of modernization of the Russian economy for 2021-2023 (Project No. SP-1061.2021.1).

For citation: Skidanov M. A., Papin V. V., Bezuglov R. V., Dyakonov E. M., Efimov N. N., Filimonov V. R. An analysis of the effect of gas turbine compressor air preheating on the technical and economic indicators of a PGU-450 unit. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):499-507. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-499-507>.

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения экономичности газотурбинной установки (ГТУ) используют различные способы, например, применение теплообменных аппаратов – регенераторов, в которых уходящие газы отдают свою теплоту воздуху, сжатому в компрессоре [1, 2], также применяют:

– повышение степени сжатия давления в компрессоре [3];

– промежуточный подвод теплоты и промежуточное охлаждение воздуха [4, 5];

– установку подогревателя сетевой воды

для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии и ГТУ в составе парогазотурбинной установки (ПГУ) [6–10];

– добавление водорода к природному газу [11–14].

В данной статье рассматриваются:

– работа ПГУ-450 при различных температурах воздуха на входе в компрессор ГТУ, нагреваемой от тепловой сети пускорезервной теплоэлектроцентрали (ПРТЭЦ) – штатной системой замкнутого контура подогрева воздуха при отнесении затраченного тепла на долю выработки электроэнергии ПГУ-450;

– прогноз изменения удельного расхода условного топлива (УРУТ) на оборудовании ПРТЭЦ при увеличении коэффициента теплофикации.

ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Испытания проводились по рабочей программе № 31-229-20 в период с 16 по 18 ноября 2020 г. Период проведения испытаний выбран исходя из условия достижения требуемых температур нагрева воздуха на входе компрессора комплексного воздухоочистительного устройства (КБОУ) без подключения пикового сетевого подогревателя и нарушения графика качественного регулирования отпуска тепла⁷. Подогрев воздуха в период испытаний осуществлялся изменением тепловой нагрузки (путем регулирования расхода сетевой воды от теплофикационной установки ПРТЭЦ и вторичного контура этиленгликоля) проектной установки замкнутого контура подогрева воздуха на входе ГТУ. Нагрев сетевой воды в теплофикационной установке осуществлялся паром из регулируемого Т-отбора паровой турбины ПТ-12/15-35/10М с параметрами 150°C 0,2 МПа, производственный отбор (пиковый бойлер) при проведении испытаний не задействовался.

Испытания проводились для диапазона температур от -5 до +10°C (подогретый воздух) с шагом 5°C при нагрузке энергоблока ПГУ 506±1 МВт. С целью исключения заведомо менее экономичного режима верхний предел температуры был ограничен температурой +7,4°C, когда наблюдался тренд по снижению суммарной нагрузки блока ПГУ-450 при полностью открытом входном направляющем аппарате (ВНА) газовых турбин. Стоит отметить, что определенная при испытаниях оптимальная температура не является константой. Значительное влияние на оптимальную температуру оказывают атмосферное давление и влажность воздуха. При

понижении атмосферного давления или увеличении относительной влажности воздуха значение оптимальной температуры снижается.

Одним из значительных факторов, влияющих на экономичность ГТУ, является сопротивление воздушного тракта перед компрессором⁸. ВНА используется для изменения массового расхода воздуха, поступающего в компрессор; закрытие ВНА приводит к увеличению сопротивления воздушного тракта. В результате снижения плотности воздуха происходит автоматическое открытие ВНА, что ведет к снижению сопротивления на входе в компрессор и увеличению КПД ГТУ. В случае снижения плотности воздуха до критической величины, когда невозможно компенсировать снижение массового расхода воздуха открытием ВНА, происходит снижение нагрузки газовой турбины и энергоблока ПГУ в целом [15–18]. Также открытие ВНА и повышение температуры на входе в компрессор приводят к увеличению расхода газов на выходе из газовой турбины, что влечет за собой увеличение температуры и расхода пара высокого давления от котлов-утилизаторов и приводит к увеличению нагрузки паровой турбины и КПД паросилового цикла.

В рассматриваемом диапазоне температур газотурбин (ГТ) и ПТ от -5 до +7,4°C изменение нагрузки произошло в следующем диапазоне:

- для 1ГТ-1 с 172,99 до 170,96 МВт снижение нагрузки составило 2,04 МВт;
- для 1ГТ-2 с 172,97 до 170,97 МВт снижение нагрузки составило 2,00 МВт;
- для 1ПТ с 160,60 до 164,91 МВт прирост нагрузки составил 4,31 МВт.

Общий прирост нагрузки в рассматриваемом диапазоне температур составил 0,27 МВт.

⁷Костюк А. Г., Фролов В. В., Булкин А. Е., Трухний А. Д. Турбины тепловых и атомных электрических станций: учебник для вузов / под ред. А. Г. Костюка, В. В. Фролова. М.: ИД МЭИ, 2001. 488 с.

⁸Цанев С. В., Бузов В. Д., Ремизов А. Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учеб. пособ. для вузов / под ред. С. В. Цанева. 3-е изд., стер. М.: ИД МЭИ, 2009. 580 с.

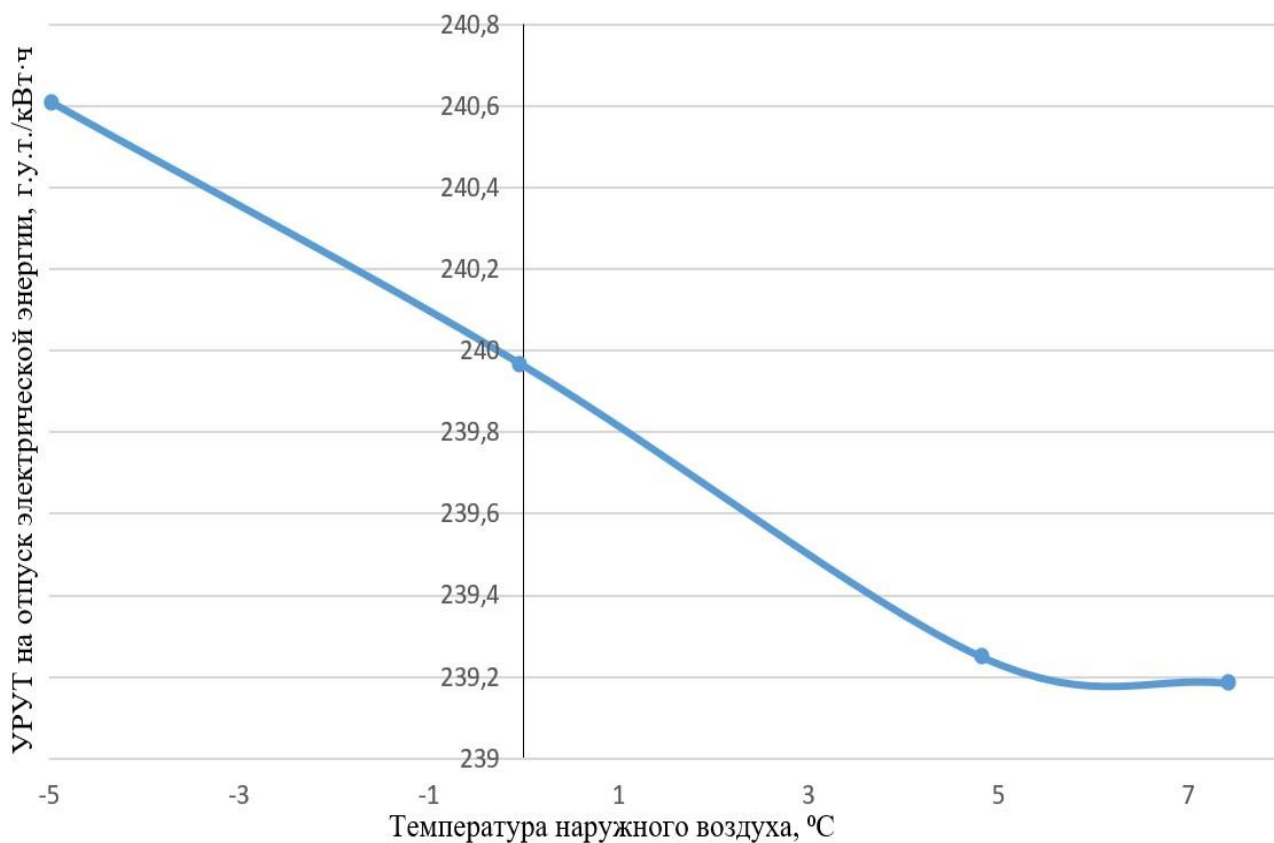


Рис. 1. График изменения удельного расхода условного топлива блока ПГУ-450 в зависимости от температуры воздуха перед компрессором
Fig. 1. Graph of changes in the specific consumption of oil equivalent of the combined cycle steam and gas turbine 450 (CCGT-450) unit depending on the pre-compressor air temperature

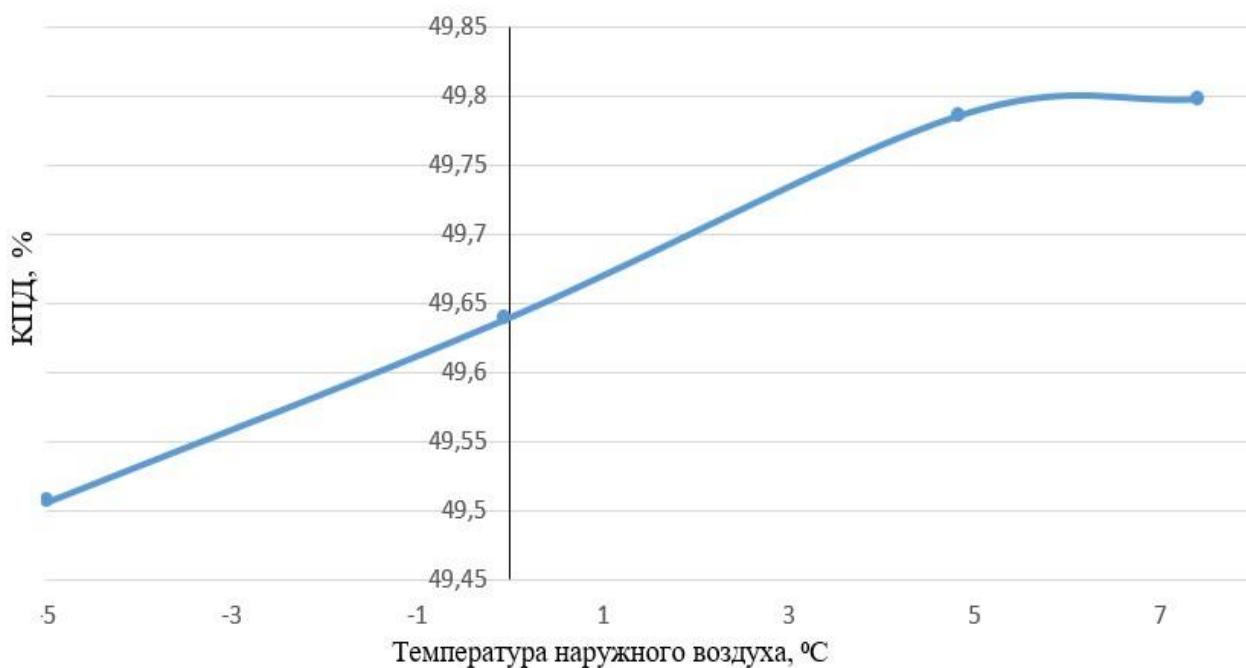


Рис. 2. График изменения коэффициента полезного действия блока ПГУ-450 в зависимости от температуры воздуха перед компрессором
Fig. 2. Graph of changes in the CCGT-450 unit efficiency depending on the pre-compressor air temperature

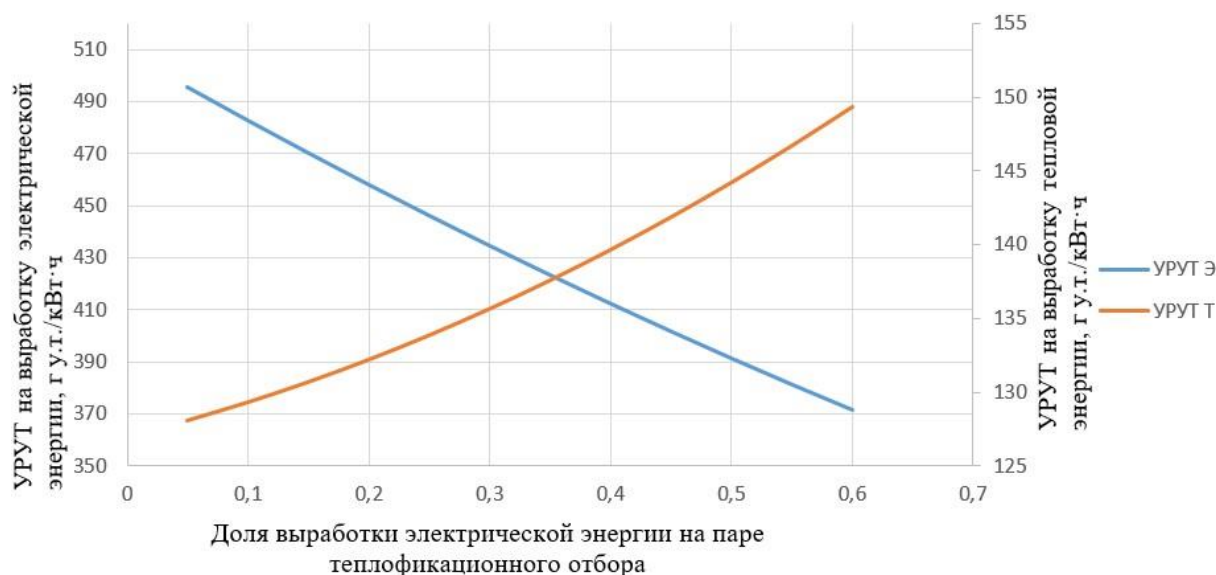


Рис. 3. Изменение удельного расхода условного топлива (г у.т./кВт) на выработку тепловой и электрической энергии в зависимости от доли выработки по теплофикационному циклу
 Fig. 3. Change in the specific consumption of oil equivalent (kg of OE/MW) for thermal and electrical energy production depending on the generation share by the heating cycle

Таблица 1. Основные параметры расчета технико-экономических показателей 18 и 22 ноября 2020 г.
 Table 1. Main parameters for calculating technical and economic indicators on November 18 and 22, 2020

Наименование показателя	Единица измерения	18 ноября	22 ноября
Пускорезервная теплоэлектроцентраль			
Выработка электроэнергии	тыс. кВт·ч	250,016	251,782
Отпуск электроэнергии	тыс. кВт·ч	222,453	224,599
Общий отпуск тепла	МВт	270,98	279,12
Удельный расход тепла топлива на отпуск тепла	кг у.т./МВт	116,51	117,32
Удельный расход топлива на отпуск электроэнергии	г/кВт·ч	389,59	392,02
Парогазотурбинная установка			
Выработка электроэнергии	тыс. кВт·ч	12142,469	11463,682
Отпуск электроэнергии	тыс. кВт·ч	12007,255	11332,453
Удельный расход топлива на отпуск электроэнергии	г/кВт·ч	242,30	244,46
Средняя температура наружного воздуха	°С	-2,8	-4,5
Расход тепла на комплексное воздухоочистительное устройство газовой турбины	МВт	89,55	52,34
Расход топлива на нагрев воздуха	т у.т.	10,43	6,14
Расход топлива на электроэнергию, приведенный к отпуску 18.11	т у.т.	2909,411	2935,279
Экономия топлива при нагреве воздуха до оптимальной температуры	т у.т.	21,578	
Уренгойская ГРЭС			
Удельный расход топлива на отпуск тепла	кг/МВт	117,45	117,32
Удельный расход топлива на отпуск электроэнергии	г/кВт·ч	244,98	247,33

Оценка влияния подогрева воздуха на УРУТ выполнена по среднему значению расхода электроэнергии на нужды блока ПГУ-450, а также без учета тепла, подводимого на подогрев воздуха КВОУ [19]. График изменения УРУТ приведен на рис. 1, график изменения КПД ПГУ-450 приведен на рис. 2.

Положительное влияние использования системы подогрева воздуха КВОУ на показатели станции при нагреве воздуха предполагалось до температуры +7,4°С.

Оценка влияния тепловой нагрузки на удельные расходы топлива для пускорезервной ТЭЦ выполнена на основании расчетов удельных расходов топлива в ноябре 2020 г. в соответствии с макетом нормативно-технической документации по топливоиспользованию филиала «Уренгойская ГРЭС» АО «Интер РАО – Электрогенерация». График изменения УРУТ на тепловую и электрическую энергии приведен на рис. 3.

Таблица 2. Результаты оценки удельного расхода условного топлива на пускорезервной теплоэлектроцентрали при увеличении тепловой нагрузки системы замкнутого контура подогрева воздуха парогазотурбинной установки
Table 2. Estimation results of the specific consumption of oil equivalent at the start-up reserve thermal power plant with an increase in the thermal load of the closed-loop air heating system of the combined cycle steam and gas turbine plant

Температура воздуха после системы подогрева, °С	Тепловая нагрузка системы подогрева воздуха комплексного воздухоочистительного устройства, МВт	Удельный расход условного топлива на электроэнергию, г у.т./кВт·ч	Удельный расход условного топлива на тепловую энергию, кг у.т./кВт·ч
0	1,98	409,93	91,21
5	3,49	394,84	93,11
7	7,33	373,53	96,46

Из графика следует, что с ростом теплофикационной нагрузки удельный расход топлива на выработку электрической энергии снижается, а удельный расход топлива на тепловую энергию возрастает. Стоит отметить, что при повышении доли выработки по теплофикационному циклу повышается значение показателя коэффициента использования тепла топлива (КИТТ), что в целом характеризует более эффективную работу энергоустановки.

Анализ аналогичных периодов 18 и 22 ноября при сравнимых показателях выработки энергии на ПРТЭЦ характеризуется более низким значением расхода условного топлива при нагреве воздуха перед компрессором ГТУ до оптимальных параметров в сравнении с существующим режимом. Основные параметры расчета технико-экономических параметров (ТЭП) сведены в табл. 1.

Стоит отметить, что в цели испытаний системы подогрева воздуха не входило прогнозирование изменения УРУТ на ПРТЭЦ, для этого использовались рассчитанные макеты нормативно-технической документации по топливоиспользованию. Анализ изменения УРУТ на выработку энергии ПРТЭЦ выполнен для температур воздуха на всасе ГТУ 18 ноября в диапазоне от 0°С до +7°С для

наиболее подходящих для сравнения суток, а также с наименьшими изменениями внешних факторов. Исследование выполнено без учета расхода энергии на собственные нужды ПРТЭЦ, за период испытаний указанная величина в удельном исчислении принята условно постоянной, за вычетом расхода топлива на подогрев воздуха на ПГУ. Результаты расчета сведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных расчетов и проведенного анализа подогрев воздуха на всасе ГТУ [20] до температуры +6,4°С при загрузке замкнутого контура подогрева воздуха и нагрева сетевой воды без пикового сетевого подогревателя приводит к положительному эффекту тепловой экономичности, который заключается в:

- повышении КПД ПГУ-450 и снижении величины расхода топлива;
- повышении выработки по теплофикационному циклу ПРТЭЦ, сопровождаемом снижением расхода топлива на производство электрической энергии и менее значительным ростом расхода топлива на тепловую энергию;
- увеличении значения показателя КИТТ.

Список источников

1. Кулагин В. В., Соколов М. А. Возможность повышения эффективности ГТУ за счет регенерации тепла // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2012. № 3-3(34). С. 57–66.
2. Marukhyan V. Z., Rafyan R. A. The influence of the gas turbine intake air temperature on the combined cycle operation // Известия Национальной Академии наук РА и Государственного инженерного университета Армении. Серия: Технические науки. 2011. Т. 64. С. 243–249.
3. Смирнов А. И., Богатова Т. Ф. Влияние степени повышения давления на эффективность ГТУ и ПГУ // Труды II науч.-техн. конф. молодых ученых Уральского энергетического института (г. Екатеринбург, 15–19 мая 2017 г.). Екатеринбург: Изд-во УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. С. 51–54.
4. Бунькова О. И., Богатова Т. Ф., Чернова М.Б. Влияние режимных факторов на экономичность работы ГТУ // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспече-

ние. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти проф. Данилова Н. И. (г. Екатеринбург, 10–14 декабря 2018 г.). Екатеринбург: Изд-во УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2018. С. 919–923.

5. Каплан М. П., Дизенко Т. П. Тепловая эффективность энергетических теплофикационных ГТУ с промежуточным охлаждением воздуха и регенерацией // Теплоэнергетика. 2002. № 8. С. 51–58.

6. Максимов М. О. Повышение эффективности комбинированного производства тепла и электроэнергии // GLOBUS. Серия: Технические науки. 2021. № 2. С. 57–66.

7. Менделеев Д. И., Галицкий Ю. Я. Исследование влияния абсорбционной холодильной машины на режимы работы парогазовой установки // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 4. С. 37–46.

8. Седнин А. В., Кушнер Д. Л. Парогазовые энергетические установки с использованием газопоршневых агрегатов и паротурбинных установок на органическом теплоносителе // Труды Академэнерго. 2014. № 1. С. 62–77.

9. Евенко В. И., Стребкова А. С. Анализ топливной экономичности газотурбинных ТЭЦ // Теплоэнергетика. 2006. № 10. С. 74–77.

10. Галишина Г. В., Гришин А. Н. Парогазовая установка на базе газотурбинной установки GT26 и котла-утилизатора П-96 // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2020. № 1. С. 38–40.

11. Марьин Г. Е., Осипов Б. М., Ахметшин А. Р., Савина М. В. Добавление водорода к топливному газу для повышения энергетических характеристик газотурбинных установок // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 3. С. 342–355. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-342-355>.

12. Марьин Г. Е., Осипов Б. М., Ахметшин А. Р. Исследование применения водорода в качестве топлива для улучшения энергетических и экологических показате-

лей работы газотурбинных установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С. 84–92. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-2-84-92>.

13. Султанов М. М., Курьянова Е. В. Технико-экономическая оценка параметров тепловых схем ТЭС с водородным генератором // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С. 46–55. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-2-46-55>.

14. Рыбаков Б. А., Буров В. Д. Сжигание водородсодержащего газа в ГТУ и ПГУ // Новое в российской электроэнергетике. 2021. № 10. С. 30–41.

15. Amirante R., Cassone E., Distaso E., Tamburrano P. Overview on recent developments in energy storage: mechanical, electrochemical and hydrogen technologies // Energy Conversion and Management. 2017. Vol. 132. P. 372–387. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.046>.

16. Contino F., Moret S., Limpens G., Jeanmart H. Whole-energy system models: the advisors for the energy transition // Progress in Energy and Combustion Science. 2020. Vol. 81. P. 100872. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2020.100872>.

17. Bontempo R., Manna M. Work and efficiency optimization of advanced gas turbine cycles // Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 195. P. 1255–1279. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.087>.

18. Colmenar-Santos A., Gómez-Camazón D., Rosales-Asensio E., Blanes-Peiró J.-J. Technological improvements in energetic efficiency and sustainability in existing combined-cycle gas turbine (CCGT) power plants // Applied Energy. 2018. Vol. 223. P. 30–51. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.191>.

19. Усмонов Н. О., Ахматова С. Р. Оптимальные параметры регулирования режимов работы газотурбинных установок // Молодой ученый. 2016. № 11. С. 515–518.

20. Fan Kunle, Yang Cheng, Xie Zhuli, Ma Xiaoqian. Load-regulation characteristics of gas turbine combined cycle power system controlled with compressor inlet air heating // Applied Thermal Engineering. 2021. Vol. 196. P. 117285. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117285>.

References

1. Kulagin V. V., Sokolov M. A. Improving the efficiency of gas turbines by regenerating heat. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S.P. Korolyova*. 2012;3-3(34):57-66. (In Russ.).

2. Marukhyan V. Z., Rafyan R. A. The influence of the gas turbine intake air temperature on the combined cycle operation. *Izvestiya Nacional'noj Akademii nauk RA i Gosudarstvennogo inzhenernogo universiteta Armenii. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2011;64:243-249.

3. Smirnov A. I., Bogatova T. F. Influence of pressure ratio on GTU and CCP efficiency. In: *Trudy II nauchno-tekhnicheskoy konferencii molodyh uchenyh Ural'skogo energeticheskogo instituta = Proceedings if the 2nd scientific and technical conference of young scientists of Ural*

Power Engineering Institute. 15–19 May 2017, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; 2017, p. 51-54. (In Russ.).

4. Bun'kova O. I., Bogatova T. F., Chernova M. B. Influence of regime factors on effectiveness of GTU performance. In: *Energo- i resursosberezhenie. Energobespechenie. Ne-tradicionnye i возобновляемые источники энергии. Atomnaya energetika: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh, posvyashchennoj pamyati prof. Danilova N. I. = Energy and resource saving. Energy supply. Non-traditional and renewable energy sources. Nuclear Energy: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and*

Young Scientists dedicated to the memory of the Professor Danilov N. I. 10–14 December 2018, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; 2018, p. 919-923. (In Russ.).

5. Kaplan M. P., Dizenko T. P. The thermal efficiency of cogeneration gas-turbine power installations with intermediate cooling of the air and regeneration. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2002;8:51-58. (In Russ.).

6. Maksimov M. O. Increasing the efficiency of combined production heat and electricity. *GLOBUS. Series: Tekhnicheskie nauki*. 2021;2:57-66. (In Russ.).

7. Mendeleev D. I., Galitskii Yu. Ya. Study of the effect of an absorption refrigeration machine on the operating modes of a combined cycle gas turbine unit. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2019;11(4):37-46. (In Russ.).

8. Sednin A. V., Kushner D. L. Combined cycle power applications applied internal combustion engine bottoming with organic Rankine cycles. *Trudy Akademenergo*. 2014;1:62-77. (In Russ.).

9. Evenko V. I., Strebkova A. S. Analysis of the fuel efficiency of gas-turbine cogeneration stations. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2006;10:74-77. (In Russ.).

10. Galishina G. V., Grishin A. N. Combined-cycle gas turbine unit on the basis of GT26 gas-turbine and P-96 recovery boiler. *Molodezhnyj vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020;1:38-40. (In Russ.).

11. Marin G. E., Osipov B. M., Akhmetshin A. R., Savina M. V. Adding hydrogen to fuel gas to improve energy performance of gas-turbine plants. *iPolytech Journal*. 2021;25(3):342-355. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-342-355>.

12. Marin G. E., Osipov B. M., Akhmetshin A. R. Research of the application of hydrogen as a fuel to improve energy and environmental performance of gas turbine plants. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2021;23(2):84-92. (In Russ.).

<https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-2-84-92>.

13. Sultanov M. M., Kuryanova E. V. Technical and economic assessment of the parameters of thermal schemes of thermal power plants with a hydrogen generator. *Problemy energetiki = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2021;23(2):46-55. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-2-46-55>.

14. Rybakov B. A., Burov V. D. Combustion of hydrogen-containing gas in combined cycle gas turbine and cogeneration installations. *Novoe v rossijskoj elektroenergetike*. 2021;10:30-41. (In Russ.).

15. Amirante R., Cassone E., Distaso E., Tamburrano P. Overview on recent developments in energy storage: mechanical, electrochemical and hydrogen technologies // *Energy Conversion and Management*. 2017;132:372-387. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.046>.

16. Contino F., Moret S., Limpens G., Jeanmart H. Whole-energy system models: the advisors for the energy transition. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2020;81:100872. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100872>.

17. Bontempo R., Manna M. Work and efficiency optimization of advanced gas turbine cycles. *Energy Conversion and Management*. 2019;195:1255-1279. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.087>.

18. Colmenar-Santos A., Gómez-Camazón D., Rosales-Asensio E., Blanes-Peiró J.-J. Technological improvements in energetic efficiency and sustainability in existing combined-cycle gas turbine (CCGT) power plants. *Applied Energy*. 2018;223:30-51. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.191>.

19. Usmonov N. O., Ahmatova S. R. Optimal parameters for regulating gas turbine installation operation modes. *Molodoj uchenyj*. 2016;11:515-518. (In Russ.).

20. Fan Kunle, Yang Cheng, Xie Zhuli, Ma Xiaoqian. Load-regulation characteristics of gas turbine combined cycle power system controlled with compressor inlet air heating. *Applied Thermal Engineering*. 2021;196:117285. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117285>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Скиданов Михаил Александрович,

ведущий инженер,
филиал «Уренгойская ГРЭС», АО «Интер ПАО –
Электрогенерация»,
629300, г. Новый Уренгой, мкр. Приозерный, 18/1/21,
Россия

Папин Владимир Владимирович,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Тепловые электрические
станции и теплотехника»,
Южно-Российский государственный политехнический
университет (НПИ) им. М. И. Платова,
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,
Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail A. Skidanov,

Leading Engineer
Urengoykaya GRES, branch of JSC Inter RAO - Electric
Power Plants,
18/1/21, Priozerny microdistrict, Novy Urengoy 629300,
Russia

Vladimir V. Papin,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Thermal Power
Plants and
Thermal Engineering,
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
132, Prosveshcheniya St., Novocherkassk 346428,
Russia

Безуглов Роман Владимирович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Тепловые электрические станции и теплотехника»,
помощник ректора,
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова,
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,
Россия

Дьяконов Евгений Михайлович,
кандидат технических наук, доцент,
проректор по образовательной деятельности,
заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции и теплотехника»,
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова,
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,
Россия

Ефимов Николай Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Тепловые электрические станции и теплотехника»,
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова,
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,
Россия

Филимонов Владимир Романович,
магистрант,
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова,
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,
Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 16.03.2022; одобрена после рецензирования 15.06.2022; принята к публикации 12.09.2022.

Roman V. Bezuglov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Thermal Power Plants and Thermal Engineering,
Rector's Assistant,
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
132, Prosveshcheniya St., Novocherkassk 346428,
Russia

Evgeny M. Dyakonov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Vice-Rector for Academic Work,
Head of the Department of Thermal Power Plants and Thermal Engineering,
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
132, Prosveshcheniya St., Novocherkassk 346428,
Russia

Nikolay N. Efimov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Thermal Power Plants and Thermal Engineering,
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
132, Prosveshcheniya St., Novocherkassk 346428,
Russia

Vladimir R. Filimonov,
Master's Degree Student,
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
132, Prosveshcheniya St., Novocherkassk 346428,
Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 16.03.2022; approved after reviewing 15.06.2022; accepted for publication 12.09.2022.



Original article

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-508-518>

Development of measures to reduce grid energy losses in the Namangan Region of Uzbekistan

Stepan G. Tiguntsev^{1✉}, Sardor B. Akhmedov², Said B. Usmonov³^{1,3}*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*²*Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia*¹*tsg@istu.edu; stiguncev@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-1525-0937*²*sarik0696@gmail.com*³*saidchik2697@gmail.com*

Abstract. The paper is aimed at developing technical and organizational measures to reduce the losses of electrical energy during its transmission via main and distribution electrical grids, in power transformers and electric power transmission lines. The focus of the study was on electrical grid modes in the Namangan Region of Uzbekistan (voltages of 220/110/35/10/6 kV), which were analyzed via technological calculation-based research methods using an equivalent circuit representing the linear circuit currently employed in the regional electric energy system. In addition, electrical grids were simulated using the software package “Program for calculating electrical grid modes” followed by the processing of calculation results by means of the Microsoft Excel package. The paper calculates electrical modes for the equivalent circuit of the regional electric energy system, as well as offering technical measures (installation of reactive power compensation devices; adjustment of transformation ratios in power transformers) aimed at adjusting voltage to improve electric power quality in terms of voltage deviations and lower power losses. Voltage deviations in most grid nodes were found to be inconsistent with GOST 32144-2013. Thus, in 35 kV, 10 kV, and 6 kV nodes, the largest underdeviation amounted to 12.45 kV, 3.26 kV, and 2.09 kV, respectively. For the placement of reactive power compensating devices having a total power of 67.82 MV·Ar, 35 kV nodes were used; in addition, the values of transformer ratios at transformer substations (35–110 kV) were determined. Calculations indicate that the conducted activities can normalize voltage in the 35 kV, 10 kV, and 6 kV nodes while reducing power losses in the electrical grid by 9.35 MW. It is estimated that the proposed measures will be paid back in approximately three years. By means of compensating reactive power and adjusting transformer ratios, these measures can reduce electrical energy losses during transmission in the considered objects and maintain a given voltage level.

Keywords: electric power quality, electrical energy losses, voltage deviation, grid mode, electrical equipment, transformer ratio

For citation: Tiguntsev S. G., Akhmedov S. B., Usmonov S. B. Development of measures to reduce grid energy losses in the Namangan Region of Uzbekistan. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):508-518. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-508-518>.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.316.722.076.12

Разработка мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях Наманганской области Республики Узбекистан

Степан Георгиевич Тигунцев^{1✉}, Сардор Бахтиярович Ахмедов², Саид Бахтиярович Усмонов³^{1,3}*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*²*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия*¹*tsg@istu.edu; stiguncev@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-1525-0937*

© Tiguntsev S. G., Akhmedov S. B., Usmonov S. B., 2022

²sarik0696@gmail.com

³saidchik2697@gmail.com

Резюме. Цель – разработка организационно-технических мероприятий по сокращению потерь электроэнергии при ее транспортировке в магистральных и распределительных электрических сетях, в силовых трансформаторах и линиях электропередачи. Объектом исследований явились режимы работы электрической сети Наманганской области Республики Узбекистан напряжением 220/110/35/10/6 кВ. Использовались технологические методы исследования расчетным путем по схеме замещения действующей линейной схемы электроэнергетической системы области. Также использовалось моделирование электрических сетей с помощью программного комплекса «Программа расчета режимов электрических сетей» и обработка результатов расчетов с помощью пакета Microsoft Excel. В результате исследований рассчитаны электрические режимы схемы замещения электроэнергетической системы области, предложены технические мероприятия (установка устройств компенсации реактивной мощности и регулирование коэффициентов трансформации силовых трансформаторов) по регулированию напряжения для повышения качества электроэнергии в части отклонения напряжений и снижению потерь мощности. Установлено, что отклонения напряжений в большинстве узлов сети не соответствуют ГОСТ 32144-2013. Так, в узлах с напряжением 35 кВ наибольшее отрицательное отклонение напряжений составило 12,45 кВ, на 10 кВ – 3,26 кВ, на 6 кВ – 2,09 кВ. Определены узлы сети на стороне 35 кВ для размещения устройств компенсации реактивной мощности, суммарное значение мощностей составило 67,82 МВ·Ар; также определены величины коэффициентов трансформации на трансформаторных подстанциях, находящихся в диапазоне 35–110 кВ. Расчетами показано, что проведенные мероприятия позволяют увеличить напряжение в узлах 35, 10, 6 кВ до нормы, а также снизить потери мощности в сети на 9,35 МВт. Установлено, что расчетная окупаемость предложенных мероприятий составит ~ 3 года. Предлагаемые мероприятия позволят сократить потери электроэнергии при ее транспортировке в изученных объектах и поддерживать напряжения на заданном уровне за счет компенсации реактивной мощности и регулирования коэффициентов трансформации.

Ключевые слова: качество электроэнергии, потери электроэнергии, отклонение напряжения, режим электрической сети, электрооборудование, коэффициент трансформации

Для цитирования: Тигунцев С. Г., Ахмедов С. Б., Усмонов С. Б. Разработка мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях Наманганской области Республики Узбекистан // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 508–518. (In Eng.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-508-518>.

INTRODUCTION

Electrical energy losses can be divided into technical and commercial losses. Since technical losses are directly related to electric power quality, it is necessary to develop methods for assessing electrical energy losses depending on the deviation of indicators characterizing electric power quality from the normalized values.

Since electric power quality has a significant effect on the operating conditions for both the electrical grid of companies and process equipment, the provision of electric power quality is the second most important task undertaken by power suppliers [1, 2].

The deviations of indicators reflecting electric power quality from the normalized values characterize the operating conditions for the electrical equipment of power suppliers and consumers, as well as possible damages both in the industrial and residential sectors.

The most common types of current-using equipment, widely used in various industries, include electric motors and electric lighting systems. Electrothermal systems, as well as valve converters, are also becoming increasingly widespread. Electric motors are used in the drives of various machinery. Systems that do not require rotational speed control during operation use asynchronous and synchronous motors⁴ [3].

Voltage deviation. Gradual changes in the supply voltage (usually lasting at least 1 minute) are typically associated with changes in the electrical grid load.

Electric power quality indicators reflecting slow changes in supply voltage include the under- $\delta U_{(-)}$ and over- $\delta U_{(+)}$ deviations of supply voltage from the nominal/matched value (%) at a given point of an electrical system:

⁴Electricity, equipment. Available from: <https://forca.com.ua> [Accessed 25th February 2022] / Электроэнергетика, обладнання [Электронный ресурс]. URL: <https://forca.com.ua> (25.02.2022).

$$\delta U_{(-)} = [(U_0 - U_{m(-)}) / U_0] \cdot 100,$$

$$\delta U_{(+)} = [(U_{m(+)} - U_0) / U_0] \cdot 100,$$

where $U_{m(-)}, U_{m(+)}$ – values of supply voltage, V, lower than U_0 and higher than U_0 , respectively, averaged over a time interval of 10 min according to subsection 5.12. of GOST 30804.4.30⁵ [4–19]; U_0 – voltage equal to the standard nominal value U_{nom} or declared voltage U_c , V.

In low-voltage electrical grids, the standard nominal supply voltage U_{nom} amounts to 220 V (between phase and neutral conductors for single-phase and four-wire three-phase systems) and 380 V (between phase conductors for three- and four-wire three-phase systems).

In medium- and high-voltage electrical grids, declared supply voltage U_c is adopted instead of the nominal supply voltage.

The following norms are set for the above-mentioned indicators characterizing electric power quality: over- and underdeviations at a given point of an electrical system should not exceed 10% of the nominal or declared voltage value during a one-week period [19].

Effect of voltage deviations on the operation of an electrical grid and equipment. Load losses of power and electrical energy in power transformers and transmission lines are proportional to the square of the current and inversely proportional to the square of the voltage, while no-load losses determined according to the expression for total power losses with voltage deviations are proportional to the square of the voltage [5, 6]:

$$\Delta P = \Delta P_{L.nom} \cdot \left(\frac{100}{100 + \delta U}\right)^2 + \Delta P_{NL.nom} \cdot \left(\frac{100}{100 + \delta U}\right)^2,$$

where $\Delta P_{L.nom}, \Delta P_{NL.nom}$ – load and no-load power losses calculated at the nominal voltage, kW; δU – voltage deviation from the nominal value, %.

The increase (decrease) in power losses as compared to the nominal value is determined as follows [5]:

$$\delta P = \frac{\delta U}{50} \cdot (\Delta P_{NL.nom} - \Delta P_{L.nom}),$$

where δP – change in power losses, kW.

Provided that $\Delta P_{NL.nom} > \Delta P_{L.nom}$ in the grid, it makes sense to reduce voltage, as at $\delta U < 0$ the total losses will be ($\delta P < 0$) [5].

According to the level of electrical energy losses, it is possible to derive conclusions about the necessity and implementation scope of energy conservation measures.

Rising grid energy losses are attributed to objective trends in the general development of the power industry. The main trends include a continuous increase in electrical grid loads associated with the natural rise in consumer loads and the lower increase rate of the power transfer capability as compared to the electricity consumption increase rate⁶ [7].

A reduction of grid energy losses constitutes a complex problem that, among other things, requires personnel training and significant capital investments essential for optimizing the development of electrical grids, improving the electrical metering systems, introducing new information technologies in power supply activities, and managing grid modes⁷ [8].

⁵GOST 30804.4.30. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality measurement methods. Moscow: Standartinform; 2014. / ГОСТ 30804.4.30. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. М.: Изд-во «Стандартинформ», 2014.

⁶On approval of the Regulations on the Ministry of Industry and Energy of the Russian Federation. Decree No. 284 of June 16, 2004. / Об утверждении Положения о Министерстве промышленности и энергетики Российской Федерации. Постановление № 284 от 16.06.2004.

⁷Vorotnickij V. E, Zaslunov S. V., Kalinkina M. A. Calculation, normalizing and reduction of electrical power losses when transmitted through electrical networks: textbook. Moscow; 2006. / Воротницкий В. Э., Заслонов С. В., Калинкина М. А. Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям: учеб.-метод. пособ. М., 2006 г.

Due to the complexity of loss calculations and the presence of significant errors, special attention has recently been paid to the development of procedures for normalizing electrical energy losses.

The technical electrical energy losses include relatively constant and load (variable) electrical energy losses. Relatively constant losses constitute a part of technical losses in electrical grids that does not depend on the transmitted power. Load losses are losses in lines, power transformers, and current-limiting reactors depending on the transmitted load. The normalization of electrical energy losses is aimed at reducing losses or maintaining them at a technically and economically reasonable level [8].

The nominal voltage and active power are typically specified for a grid element in the considered load mode. The amount of voltage loss in a given grid element can be altered by changing its resistance and inductive reactance or reactive power transmitted through it.

Changes in the amount of transmitted reactive power affect voltage levels. Reactive power can be produced by power plant generators, as well as other reactive power sources, i.e., com-

pensating devices (CDs) and transmission lines. By regulating the amount of reactive power generated by different sources, it is possible to adjust the grid load in the section between them and the consequent amount of voltage losses in that grid section⁸ [11].

When developing grid development circuits, the reactive power shortage is ascertained at the stage of determining the balance between active and reactive power in distribution nodes for the calculation period. According to the calculation data, issues related to the required number of reactive power CDs, as well as their placement points, are addressed in the circuit. It is a priority to place CDs close to the consumer since this factor significantly affects grid energy losses and its quality at the consumer⁹ [12].

Two-winding and three-winding transformers, as well as autotransformers, can be installed at various points in electrical grids to increase or decrease grid voltage. The voltage mode at transformer installation points is typically unknown in advance; moreover, it may vary due to changes in energy consumption modes or grid parameters [13].

In order to effectively adjust voltage so as to maintain the required voltage levels (as per

⁸Ananicheva S. S., Alekseev A. A., Myzin A. L. Electrical power quality. Regulation of voltage and frequency in power systems: learning aids. Ekaterinburg; 2012, 93 p. / Ананичева С. С., Алексеев А. А., Мызин А. Л. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учеб.-метод. пособ. Екатеринбург, 2012. 93 с.

⁹Neklepaev B. N. Electrical part of power stations and substations: learning aids. Irkutsk, 1986. 640 p. / Неклепаев Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: учеб.-метод. пособ. Иркутск, 1986. 640 с.

¹⁰Strategy of energy efficiency improvement in municipalities. Available from: <https://pandia.ru/text/78/270/67411.php>. [Accessed 27th February 2022] / Стратегия повышения энергоэффективности в муниципальных образованиях [Электронный ресурс]. URL: <https://pandia.ru/text/78/270/67411.php>. (27.02.2022).

¹¹Akishin L. A., Prokopchuk K. I., Starostina E. B., Snopkova N. Yu. Electric power systems and networks: methodological guidelines for practice and course design. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2015, 80 p. / Акишин Л. А., Прокопчук К. И., Старостина Э. Б., Снопкова Н. Ю. Электроэнергетические системы и сети: метод. указания для практ. занятий и курсового проектирования. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 80 с.

¹²Idel'chik V. I. Electrical power systems and networks: a textbook for universities. Moscow: Izdatel'skij dom Al'yans; 2009, 592 p. / Идельчик В. И. Электрические системы и сети: учебник для вузов. М.: ООО «Издательский дом Альянс», 2009. 592 с.

¹³Fajbisovich D. L. Handbook on electrical network design. Moscow: Innovation Center ENAS; 2009, 392p. / Файбисович Д. Л. Справочник по проектированию электрических сетей. М.: НЦ «ЭНАС», 2009. 392 с.

¹⁴Neklepaev B. N., Kryuchkov I. P. Electrical part of power stations and substations. Reference materials for course and diploma designing: textbook for universities. 4th edition, revised. Moscow: Energoatomizdat; 1989, 608 p. / Неклепаев Б. Н., Крючков И. П. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: учеб. пособ. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 1989. 608 с.

¹⁵Rozhkova L. D., Kozulin V. S. Electrical equipment for stations and substations: a textbook for engineering vocational schools. Moscow: Energoatomizdat; 1987, 648 p. / Рожкова Л. Д., Козулин В. С. Электрооборудование для станций и подстанций: учебник для техникумов. М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 1987. 648 с.

GOST 32144-2013¹⁶) at consumer buses and ensure energy-saving grid modes, it is necessary to modify transformer ratios. Therefore, step-down transformers and autotransformers are produced to allow for a 10–20% variation of the transformer ratio. If the highest nominal voltage does not exceed 220 kV, taps are typically on the supply side, i.e., on the high-voltage side in step-down transformers. At higher nominal voltages, grids are equipped with autotransformers featuring either mid-taps or those placed at the neutral point of common winding¹⁰⁻¹⁶ [12].

At the main substations, voltage should be adjusted via the counterload voltage control. In the case of extended feeders, it is used to reduce electrical energy losses and ensure an appropriate voltage level; self-regulating capacitor banks or voltage boosters should be installed as voltage regulators [13].

The paper examines the 220/110/35/10/6 kV electrical grid in the Namangan Region of Uzbekistan, calculates operating modes, as well as proposing technical measures aimed at adjusting voltage so as to improve electric power quality in terms of voltage deviation and lower power losses. The cost of the proposed measures was estimated. The studies involved calculations according to the linear circuit currently employed in the regional electric energy system. In order to simplify the calculations, a part of the circuit was selected. Fig. 1 shows a simplified electrical circuit of the Namangan Region.

An equivalent circuit was designed to calculate the modes. For each element (transformer, line, reactor, and substation buses), resistance and reactance, as well as the capacitive susceptance of transmission lines, were calculated¹⁰⁻¹⁴ [14–23]. For system transformers and autotransformers, resistance, reactance, transformer ratios, conductance, and shunt susceptance were determined.

In the grid, 6–10 kV electricity consumers were taken into account. Load values were obtained from the results of control measurements performed in 2016.

The initial data were entered into the PRRS computing system for calculating electrical grid modes developed at the Irkutsk National Research Technical University. The number of all nodes amounted to 461. For convenience, the nodes were numbered according to their voltage: for example, nodes numbered from 2000 – 220 kV, from 1000 – 110 kV, from 3000 – 35 kV, from 4100 – 10 kV, and from 4600 – 6 kV. The equivalent circuit parameters were entered in “Data: Nodes” and “Data: Connections.”

Fig. 3 shows a graph representing the voltage level of 35/10/6 kV nodes. It can be seen from the graphs that voltage deviations are inconsistent with GOST 32144-2013¹⁶, varying across a wide range. Thus, in the 35 kV, 10 kV, and 6 kV nodes, the largest voltage deviation amounted to 12.45 kV (3105 Galaba node), 3.26 kV (4142 Gova node), and 2.09 kV (4626 Yangier node), respectively.

With the mode calculation results in mind, it is proposed to select CD placement points and reduce transformer ratios by 10% at 110–35 kV transformer substations in order to reduce voltage deviations.

It is assumed that the proposed measures can increase voltage in the 110/35/10/6 kV nodes, as well as reducing grid power losses.

The studies revealed that the best CD placement points are the 35 kV nodes. The calculations yielded the following CD power values in the 35 kV nodes (see table).

It can be seen in fig. 3 a and 3 b that the implemented measures allow the transformer ratio K_t to be reduced by 10%, while the installation of CDs enabled a voltage normalization in the 35 kV, 10 kV, and 6 kV nodes, as well as reducing the grid power losses by 9.35 MW, which is determined as the difference between active power losses in the grid elements prior to (see fig. 2 a) and following (see fig. 2 b) the CD installation.

ECONOMIC INDICATORS

For CD installation, 35 kV nodes with selected placement points were used. Thirteen CDs

¹⁶GOST 32144-2013. Electrical Energy. Electromagnetic compatibility of engineering equipment. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems. Moscow: Standartinform; 2014. / ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Изд-во «Стандартинформ», 2014.

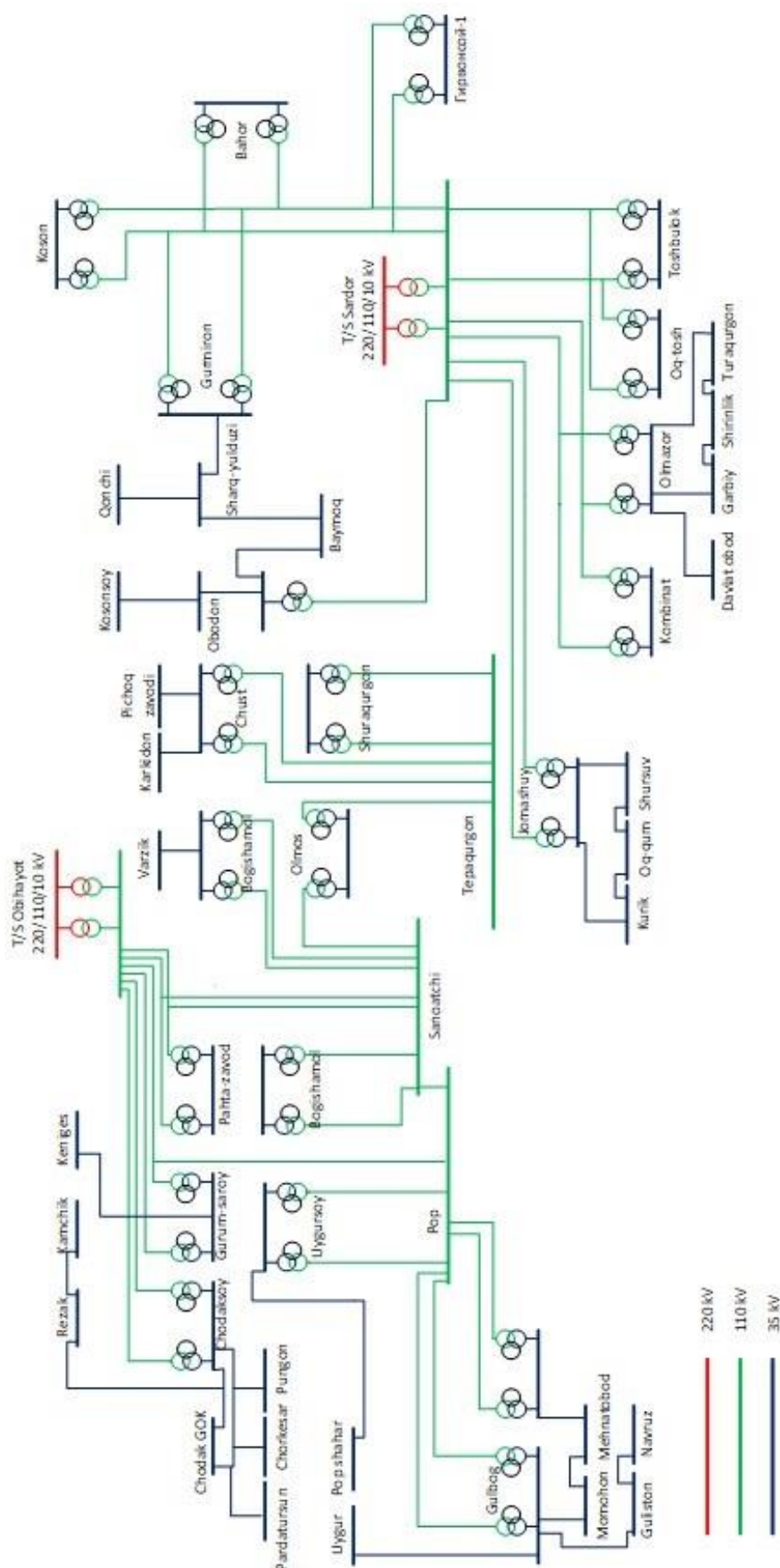


Fig. 1. Simplified linear circuit of the electrical grid in the Namangan Region
Рис. 1. Упрощенная линейная схема электрической сети Наманганской области

результат: схема			
количество подсистем	1		
отключено связей	0		
погашено узлов	0		
суммарные: (мвт)/(мгвар)	активные	реактивные	
выработка на станциях	374.09	387.63	
нагрузка потребителей	335.71	251.68	
нагрузка в шунтах	0.00	0.00	
потери в связях - QL	38.39	135.95	
установленная нагрузка	335.71	251.68	
потери в линиях	20.45	39.05	
потери в шунтах линий	0.00	0.00	
генерация ЛЭП = QL	0.00	52.20	
потери в трансформаторах	17.94	149.10	
потери в шунтах трансф-ров	8.00	41.87	
баланс W(x): k-нормы	0.00	0.00	

a

результат: схема			
количество подсистем	1		
отключено связей	0		
погашено узлов	0		
суммарные: (мвт)/(мгвар)	активные	реактивные	
выработка на станциях	364.75	347.11	
нагрузка потребителей	335.71	251.87	
нагрузка в шунтах	0.00	0.00	
потери в связях - QL	29.04	95.24	
установленная нагрузка	335.71	251.87	
потери в линиях	13.53	28.84	
потери в шунтах линий	0.00	0.00	
генерация ЛЭП = QL	0.00	54.06	
потери в трансформаторах	15.52	120.46	
потери в шунтах трансф-ров	8.73	45.50	
баланс W(x): k-нормы	0.00	0.00	

b

Fig. 2. General mode calculation results obtained in the PRRES program:

a – prior to the implementation of measures; b – following the implementation of measures

Рис. 2. Общие результаты расчета режима в программе «ПРЕСС»: а – результаты до осуществления мероприятий; б – результаты после осуществления мероприятий

Power values of the compensating device

Значения мощностей компенсирующих устройств

Node Name	Node Number	Voltages before CD installation, kV	Power CD Mvar	Voltage after installation of CD, kV
Haqiqat	3042	25.24	2.02	35
Youngiyerr	3047	24.78	4.56	35
Momohon	3050	26.94	7.1	35
Navruz	3053	25.11	5.32	35
3057	3057	25.67	7.23	35
Mashrab	3081	24.67	5.34	35
Turakurgon-2	3088	23.55	7.83	35
30911	30911	23.01	6.13	35
Gova	3101	24.82	0.9	35
Galaba	3104	22.55	11.01	35
Marmar	3108	28.26	1.14	35
Tergachi	3111	27.88	5.08	35
3115	3115	28.06	4.16	35
Sum Q_{CD}	–	–	67.82	–

having a total power of 67.82 Mvar were installed (see table).

The installation cost of a 1 Mvar CD comes to \$50,000 [16]. The average cost of electricity per 1 kW/h amounts to \$0.37 in the republic.

Thus, the CD cost comes to $67.82 \cdot 50,000 = \$3,391,000$.

The amount of electrical energy saved due to the reduced active energy losses is determined as follows:

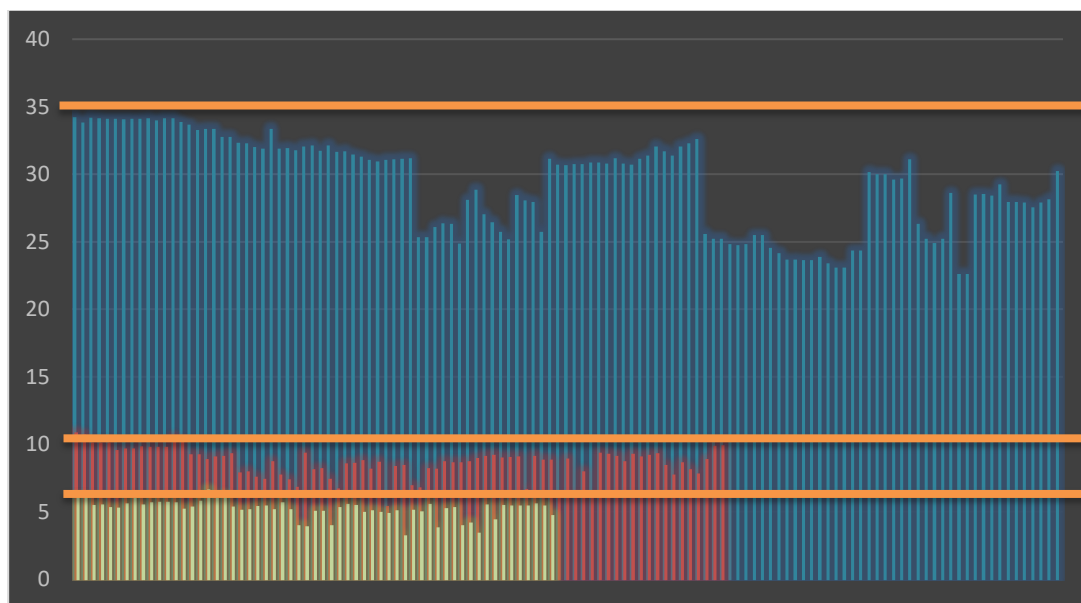
$$\Delta W = \Delta P \cdot \frac{T}{k},$$

where ΔP – reduction in active power losses in the grid, MW; T – number of hours per year, h; k – average load factor.

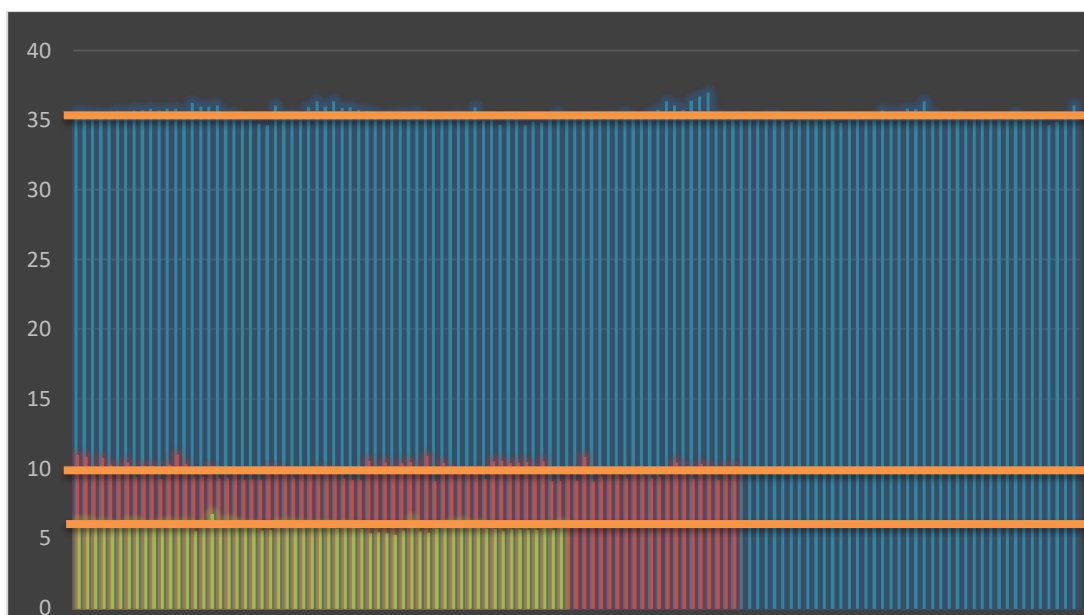
$$\Delta W = 9.35 \cdot \frac{8760}{2.19} = 37,400 \frac{MW}{h}.$$

Thus, the cost of electricity saved over one year amounts to

$$\Delta C = 37,400 \cdot 37 = \$1,383,800.$$



a



b

Fig. 3. Graph representing the 35-10-6 kV voltage level: a – prior to the implementation of measures; b – following the implementation of measures
Рис. 3. График уровня напряжений 35-10-6 кВ: а – результаты до осуществления мероприятий; б – результаты после осуществления мероприятий

It takes about three years for the measures aimed at reducing active energy losses and normalizing voltage deviations to be paid back, i.e.:

$$3,391,000 \div 1,383,800 = 2.45 \approx 3 \text{ years.}$$

CONCLUSION

The conducted studies indicate that the

electrical grids of the Namangan Region in Uzbekistan require the implementation of the proposed measures: reactive power compensation and transformer ratio adjustment to reduce electrical energy losses and maintain voltage at a given level.

The proposed measures allow electrical energy losses to be reduced by 24% while saving \$1.38 million a year and normalizing

the voltage level in 6–10 kV consumers.
In case Uzbekistan grid companies take an

interest in this work, it is possible to organize cooperation.

References

1. Zaslouov S. V., Kalinkina M. A. Calculation of power and electricity technical losses in 0.38-10 kV distribution networks. *Energetik*. 2002;7:21-22. (In Russ.).
2. Dolinger S. Yu., Goryunov V. N., Plankov A. A., Sidorov O. A. Schemes of active filtering of current in four-wire three-phase network for improving power quality. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2011;3:214-217. (In Russ.).
3. Sikorski T., Rezmer J. Distributed generation and its impact on power quality in low voltage distribution networks. *Power Quality Issues in Distributed Generation*. 2015;1(6):34-41. <https://doi.org/10.15199/48.2015.06.05>.
4. Sudnova V. V. *Quality of electrical energy*. Moscow: Energoservis; 2000, 80. (In Russ.).
5. Voinov S. L., Gamm A. 3., Golub I. I., Zhezhenko I. V., Zhelezko Yu. S., Nejman V. V., et al. *Rationing of electrical power quality indicators and their optimization*. Glivice – Irkutsk; 1988, 249 p. (In Russ.).
6. Goryunov V. N., Osipov D. S., Lyutarevich A. G. Calculation of power losses depending on higher harmonics. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2009;2:268-273. (In Russ.).
7. Bushuev V. V., Lizalek N. N., Novikov N. L. *Dynamic properties of power systems*. Moscow: Energoatomizdat; 1995, 320 p. (In Russ.).
8. Vittal V., McCalley J. D., Anderson P. M., Fouad A. A. *Power system control and stability*. 3rd Edition. Hoboken: Wiley-IEEE Press; 2002, 832 p.
9. Sadykova F. M. Analysis of electrical energy losses and their reduction methods in the Makhachkala power grids. Rationing of electrical energy technological losses. *Sistemnye tekhnologii*. 2014;12:90-95.
10. Andrianova L. P., Valeev R. I. Problems of ensuring electrical power quality and methods to reduce losses in 0.4 kV rural distribution electrical networks. *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal "Innovacionnaya Nauka"*. 2018;03:20-24. (In Russ.).
11. Chen Yu, Xu Zhao, Ostergaard J. Frequency analysis for planned islanding operation in the Danish distribution system – Bornholm. In: *43rd International Universities Power Engineering Conference*. 1–4 September 2008, Padova. Padova: IEEE; 2008. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2008.4651467>.
12. Nourollah S., Charehpetian G. B. Coordinated load shedding strategy to restore voltage and frequency of microgrid to secure region. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019;10(4):4360-4368. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2857840>.
13. Vadi S., Padmanaban S., Bayindir R., Blaabjerg F., Mihet-Popa L. A review on optimization and control methods used to provide transient stability in microgrids. *Energies*. 2019;12(18). <https://doi.org/10.3390/en12183582>.
14. Merkuriev G. V., Shargin Yu. M. *Power system stability*. In 2 vol., vol. 2. St. Petersburg: Nonstate private educational institution of additional professional education Center for Training Energy Personnel; 2008, 376 p. (In Russ.).
15. Khan M. T. A review of electrical energy management techniques: supply and consumer side (industries). *Journal of Energy in Southern Africa*. 2009;20(3):312-336. <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2009/v20i3a3304>.
16. Belyaev N. A., Egorov A. E., Korovkin N. V., Chudnyj V. S. Consideration of capacity adequacy criterion in optimizing the prospective structure of electric power system. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2020;13(1):11-16. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-1-11-16>.
17. Tsumura T., Takeda T., Hirose K. A tool for calculating reliability of power supply for information and communication technology systems. In: *INTELEC 2008 - 2008 IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference*. 14–18 September 2008, San Diego. San Diego: IEEE; 2008. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2008.4664080>.
18. Volodarskii V. A. Estimation of distribution function parameters with incompleteness of information on gradual failures of electrical equipment. *Promyshlennaya energetika*. 2019;8:8-13. (In Russ.).
19. Amuzade A. S., Tankovich T. I. Analysis of reliability indicators of power supply systems. In: N. V. Kuz'mina, V. A. Kozlova, N. M. Romanchenko (eds.). *Resursosberegayushchie tekhnologii sel'skogo hozyajstva = Agricultural resource-saving technologies*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University; 2019, p. 61-66. (In Russ.).
20. Khristinich R. M., Lukovenko A. S. Power transformers reliability and mode of operation in the ultimate load prediction. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2015;2:130-136. (In Russ.).
21. Karagodin V. V., Revyakov B. A., Rybakov D. V. An approach to determination of power supply system reliability. *Trudy voenno-kosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhajskogo = Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. Saint-Petersburg: the Mozhaisky Military Space Academy. 2018, p. 121-125. (In Russ.).
22. Malafeev A., Iuldasheva A. The structural reliability and adequacy assessment of the industrial electric power systems with local power plants. *Machines. Technologies. Materials*. 2018;12(4):165-168.
23. Ayuev B. I., Davydov V. V., Erokhin P. M. Fast and reliable method of searching power system marginal states. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2016;31(6):4525-4533. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2538299>.

Список источников

1. Заслонов С. В., Калинкина М. А. Расчет технических потерь мощности и электроэнергии в распределительных сетях 0,38-10 кВ // Энергетик. 2002. № 7. С. 21–22.
2. Долингер С. Ю., Горюнов В. Н., Планков А. А., Сидоров О. А. Схематические решения активной фильтрации кривой тока в четырехпроводной трехфазной сети для обеспечения качества электрической энергии // Омский научный вестник. 2011. № 3. С. 214–217.
3. Sikorski T., Rezmer J. Distributed generation and its impact on power quality in low-voltage distribution networks // Power Quality Issues in Distributed Generation. 2015. Vol. 1. Iss. 6. P. 34–41. <https://doi.org/10.15199/48.2015.06.05>.
4. Суднова В. В. Качество электрической энергии. М.: Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2000. 80 с.
5. Воинов С. Л., Гамм А. З., Голуб И. И., Жежеленко И. В., Железко Ю. С., Нейман В. В. [и др.]. Нормирование показателей качества электроэнергии и их оптимизация: монография. Гливице – Иркутск, 1988. 249 с.
6. Горюнов В. Н., Осипов Д. С., Лютаревич А. Г. Расчет потерь мощности от влияния высших гармоник // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 2. С. 268–273.
7. Бушуев В. В., Лизалек Н. Н., Новиков Н. Л. Динамические свойства энергосистем. М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 1995. 320 с.
8. Vittal V., McCalley J. D., Anderson P. M., Fouad A. A. Power system control and stability. 3rd Edition. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2002. 832 p.
9. Садыкова Ф. М. Анализ потерь электрической энергии и пути их снижения в городских электрических сетях г. Махачкалы. Нормирование технологических потерь электрической энергии // Системные технологии. 2014. № 12. С. 90–95.
10. Андрианова Л. П., Валеев Р. И. Проблемы обеспечения качества электроэнергии и пути снижения потерь в сельских распределительных электрических сетях 0,4 кВ // Международный научный журнал «Инновационная Наука». 2018. № 03. С. 20–24.
11. Chen Yu, Xu Zhao, Ostergaard J. Frequency analysis for planned islanding operation in the Danish distribution system – Bornholm // Proceedings of 43rd International Universities Power Engineering Conference (Padova, 1–4 September 2008). Padova: IEEE; 2008. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2008.4651467>.
12. Nourollah S., Charehpetian G. B. Coordinated Load Shedding Strategy to Restore Voltage and Frequency of Microgrid to Secure Region // IEEE Transactions on Smart Grid. 2019. Vol. 10. Iss. 4. P. 4360–4368. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2857840>.
13. Vadi S., Padmanaban S., Bayindir R., Blaabjerg F., Mihet-Popa L. A Review on Optimization and Control Methods Used to Provide Transient Stability in Microgrids // Energies. 2019. Vol. 12. Iss. 18. <https://doi.org/10.3390/en12183582>.
14. Меркурьев Г. В., Шаргин Ю. М. Устойчивость энергосистем. В 2-х т., т. 2. СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2008. 376 с.
15. Khan M. T. A review of electrical energy management techniques: supply and consumer side (industries) // Journal of Energy in Southern Africa. 2009. Vol. 20. No. 3. P. 312–336. <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2009/v20i3a3304>.
16. Беляев Н. А., Егоров А. Е., Коровкин Н. В., Чудный В. С. Учет критерия балансовой надежности при оптимизации перспективной структуры энергосистемы // Надежность и безопасность энергетики. 2020. Т. 13. № 1. С. 11–16. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-1-11-16>.
17. Tsumura T., Takeda T., Hirose K. A tool for calculating reliability of power supply for information and communication technology systems // INTELEC 2008 - 2008 IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference (San Diego, 14–18 September 2008). San Diego: IEEE, 2008. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2008.4664080>.
18. Володарский В. А. Оценка параметров функций распределения при неполноте информации о постепенных отказах электрооборудования // Промышленная энергетика. 2019. № 8. С. 8–13.
19. Амузаде А. С., Танкович Т. И. Анализ показателей надежности систем электроснабжения // Ресурсосберегающие технологии сельского хозяйства: сб. науч. ст. Вып. 11 / под ред. Н. В. Кузьмина, В. А. Козлова, Н. М. Романченко. Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2019. С. 61–66.
20. Христинич Р. М., Луковенко А. С. Прогнозирование надежности и режимов работы тяговых трансформаторов в условиях предельной нагрузки // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2. С. 130–136.
21. Карагодин В. В., Ревяков Б. А., Рыбаков Д. В. Подход к определению надежности систем электроснабжения // Труды военно-космической академии имени А.Ф. Можайского Вып. 663. СПб.: Изд-во Военно-космической акад. им. А. Ф. Можайского, 2018. С. 121–125.
22. Malafeev A., Iuldasheva A. The structural reliability and adequacy assessment of the industrial electric power systems with local power plants // Machines. Technologies. Materials. 2018. Vol. 12. Issue 4. P. 165–168.
23. Ayuev B. I., Davydov V. V., Erokhin P. M. Fast and reliable method of searching power system marginal states // IEEE Transactions on Power Systems. 2016. Vol. 31. No. 6. P. 4525–4533. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2538299>.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stepan G. Tiguntsev,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Electric Power Plants, Networks and Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Sardor B. Akhmedov,

Postgraduate Student,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Said B. Usmonov,

Master's Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 31.05.2022; approved after reviewing 21.07.2022; accepted for publication 19.09.2022.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тигунцев Степан Георгиевич,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электрические станции,
системы и сети»,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Ахмедов Сардор Бахтиярович,

аспирант,
Институт систем энергетики им.
Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

Усмонов Саид Бахтиярович,

магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 31.05.2022; одобрена после рецензирования 21.07.2022; принята к публикации 19.09.2022.



Научная статья

УДК 621.316.3

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-519-531>

Математическая модель теплового режима воздушной линии электропередачи с учетом изменения температуры по длине

Владислав Михайлович Троценко^{1✉}, Станислав Сергеевич Гиршин²,
Елена Владимировна Петрова³, Олег Алексеевич Сидоров⁴,
Евгения Викторовна Румянцева⁵, Елена Петровна Жиленко⁶,
Владимир Николаевич Горюнов⁷

^{1-3,5-7} Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

⁴ Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

¹ troch_93@mail.ru, orcid.org/0000-0002-4250-371X

² stansg@mail.ru, orcid.org/0000-0002-0650-1880

³ evpetrova2000@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7866-5630

⁴ SidorovOA@omgups.ru, orcid.org/0000-0003-1981-3338

⁵ jeka30981@mail.ru, orcid.org/0000-0002-6232-1382

⁶ epzhilenko@omgtu.ru

⁷ vladimirgoryunov2016@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-4707-2023

Резюме. Цель – разработать математическую модель температурного режима провода воздушной линии с учетом осевой передачи тепла. Объектом исследования явились воздушные линии электропередачи. В работе использованы аналитические и численные методы решения дифференциальных уравнений, включая метод конечных разностей. Решено уравнение теплопроводности для проводов марок АС-240/32 и СИП-2 3х95+1х95 при изменении тока по длине линии. Предложено аналитическое решение уравнения теплопроводности для установившегося режима провода при одинаковом токе на всех участках линии с учетом температурной зависимости активного сопротивления. Показана достоверность полученных результатов при сравнении аналитического метода с методом конечных разностей. Установлено, что граничные условия в начале и в конце линии оказывают влияние на ее температуру лишь в пределах нескольких метров. При этом степень этого влияния несколько возрастает с увеличением тока вследствие температурной зависимости тепловыделения, но остается малой вплоть до токов аварийного уровня. Поэтому расчеты теплового режима линии не требуют задания граничных условий с высокой точностью. Показано, что в линии с равномерно распределенной нагрузкой при большом изменении тока по длине результаты отличаются. Так, абсолютная погрешность аналитического решения (по сравнению с методом конечных разностей) по максимальной температуре составляет 77,9°C, а относительная погрешность по потерям равна 10%, аналогичные погрешности расчета температуры неограниченно длинного провода как функции длины составляют 2,5°C и 0,1%. Следовательно, несмотря на высокую теплопроводность металла, модель с нулевой теплопроводностью по оси провода дает наиболее точные результаты, чем модель с бесконечно большой теплопроводностью. Полученные результаты позволяют уточнить суммарные потери активной мощности, а также оценить пропускную способность линии по максимально допустимой температуре, которая зависит от типа проводов и составляет 70°C для неизолированных сталеалюминиевых и 90°C для самонесущих изолированных проводов.

Ключевые слова: потери мощности, температура провода, осевая передача тепла, уравнение теплопроводности, тепловой масштаб длины, метод конечных разностей

Для цитирования: Троценко В. М., Гиршин С. С., Петрова Е. В., Сидоров О. А., Румянцева Е. В., Жиленко Е. П., Горюнов В. Н. Математическая модель теплового режима воздушной линии электропередачи с учетом изменения температуры по длине // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 519–531. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-519-531>.

Original article

Mathematical model of the thermal mode of overhead power lines considering temperature variations along the line length

Vladislav M. Trotsenko^{1✉}, Stanislav S. Girshin², Elena V. Petrova³, Oleg A. Sidorov⁴, Evgeniya V. Rumyantseva⁵, Elena P. Zhilenko⁶, Vladimir N. Goryunov⁷

^{1-3,5-7}Omsk State Technical University, Omsk, Russia

⁴Omsk State Transport University, Omsk, Russia

¹troch_93@mail.ru, orcid.org/0000-0002-4250-371X

²stansg@mail.ru, orcid.org/0000-0002-0650-1880

³evpetrova2000@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7866-5630

⁴SidorovOA@omgups.ru, orcid.org/0000-0003-1981-3338

⁵jeka30981@mail.ru, orcid.org/0000-0002-6232-1382

⁶epzhilenko@omgtu.ru

⁷vladimirgoryunov2016@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-4707-2023

Abstract. A mathematical model representing the temperature mode of an overhead power line wire and taking into account the axial heat transfer was developed. Processes in overhead power lines were analyzed using analytical and numerical methods for solving differential equations, including the finite difference method. The equation of thermal conductivity for AS-240/32 and SIP-2 3x95+1x95 wires was solved for the case of current variations along the line length. An analytical solution to the equation of thermal conductivity was proposed for the steady-state operation of an overhead wire under the same current in all sections of the line, taking into account the temperature dependence of active resistance. The results obtained by the analytical method agree well with those obtained by the method of finite differences. The boundary conditions at the beginning and at the end of the line were established to affect the line temperature only within a few meters. At the same time, despite the slight increase in the degree of this effect at an increase in the current due to the temperature dependence of heat emission, it remains small up to emergency level currents. Therefore, the calculations of the line thermal mode require no high accuracy in setting boundary conditions. A line with a uniformly distributed load demonstrates differing results at large current variations along the wire length. Thus, the absolute error of the analytical solution (compared to the finite difference method) for the maximum temperature equals 77.9°C, while the relative error for losses equals 10%. The same errors in temperature calculations for an infinitely long wire in terms of the length function comprise 2.5°C and 0.1%, respectively. Therefore, despite the high thermal conductivity of a metal, a model with a zero thermal conductivity along the wire axis gives more accurate results as compared to a model with an infinitely high thermal conductivity. The obtained results are applicable when clarifying the total loss of active power, as well as for estimating the line capacity according to the maximum permissible temperature, which depends on the type of wires and comprises 70 and 90°C for uninsulated steel-aluminum and self-supporting insulated wires, respectively.

Keywords: power losses, wire temperature, axial heat transfer, heat transfer equation, thermal length scale, finite difference method

For citation: Trotsenko V. M., Girshin S. S., Petrova E. V., Sidorov O. A., Rumyantseva E. V., Zhilenko E. P., Goryunov V. N. Mathematical model of the thermal mode of overhead power lines considering temperature variations along the line length. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):519-531. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-519-531>.

ВВЕДЕНИЕ

С ростом потребления электроэнергии все более важным становится внедрение энергосберегающих методов и технологий передачи энергии. Введение мероприятий по повышению энергоэффективности в значительной мере зависит от точности расчета потерь энергии, которая может быть повышена на основе использования математических моделей с учетом таких факторов, как температурная зависимость активного сопро-

тивления, скорость ветра, тепловое излучение, солнечная радиация. Учет приведенных выше факторов сводится к расчету температуры токоведущих частей элементов сети, в частности, линий электропередачи. На данный момент существует множество математических моделей для нахождения температуры проводов, как в стационарном, так и в нестационарном режиме. В ряде современных отечественных и зарубежных публикаций рассматриваются вопросы повышения точ-

ности расчета потерь активной мощности с учетом температуры в стационарном режиме для неизолированных [1–5] и изолированных [1, 6, 7] проводов. В работе [8] исследованы методы и средства снижения потерь электроэнергии в сетях 0,4–110 кВ, проведен их сравнительный анализ, а также методы нормирования потерь. Статья [9] посвящена расчету тепловых потерь по техническим брошюрам стандарта CIGRE 207⁸, где обсуждается важность учета метеорологических условий, а в статье [10] производится расчет тепловых потерь для нестационарного режима провода с учетом климатических условий. Полученные результаты сравниваются с ограничениями мощности в летний и зимний периоды, производится сравнение двух стандартов CIGRE 601 и CIGRE 207. В публикациях [11–17] рассматриваются вопросы статической и динамической оценки теплового режима линии при изменении погодных условий в реальном времени.

Однако все используемые в настоящее время модели теплового режима линии основаны на допущении, что передача тепла внутри провода осуществляется только перпендикулярно его оси (радиальный тепловой поток). В действительности в линиях переменного тока величина электрического тока существенно меняется по длине, что приводит к передаче тепла также и вдоль оси провода (осевой поток тепла). В статье предложена математическая модель температурного режима провода, учитывающая как ради-

альную, так и осевую передачу тепла. Анализ распределения температуры по длине линии позволяет не только уточнить потери энергии, но и оценить пропускную способность линии (максимум температуры) с учетом осевой передачи тепла.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Уравнение теплопроводности неизолированного провода для осевой передачи тепла. Рассмотрим участок провода бесконечно малой длины dx (рис. 1). Уравнение теплового баланса этого участка имеет вид:

$$\begin{aligned} Q'_x + dQ_{\text{выд}} + dQ_{\text{солн}} &= \\ &= Q''_x + dQ_{\text{конв}} + dQ_{\text{изл}} + dW, \end{aligned} \quad (1)$$

где Q'_x – входящий осевой поток тепла (количество теплоты, входящее в выделенный участок провода слева вдоль оси x в единицу времени), Вт; Q''_x – исходящий осевой поток тепла, Вт; $dQ_{\text{выд}}$ – мощность тепловыделения внутри участка провода; $dQ_{\text{солн}}$ – количество теплоты, получаемое участком провода в единицу времени путем солнечной радиации; $dQ_{\text{конв}}$ и $dQ_{\text{изл}}$ – количества теплоты, отводимые от поверхности участка провода в единицу времени путем конвекции и излучения; dW – изменение внутренней энергии участка провода в единицу времени.

Используем приближение тонкого стержня^{9,10} [18, 19]. Это означает, что радиальное

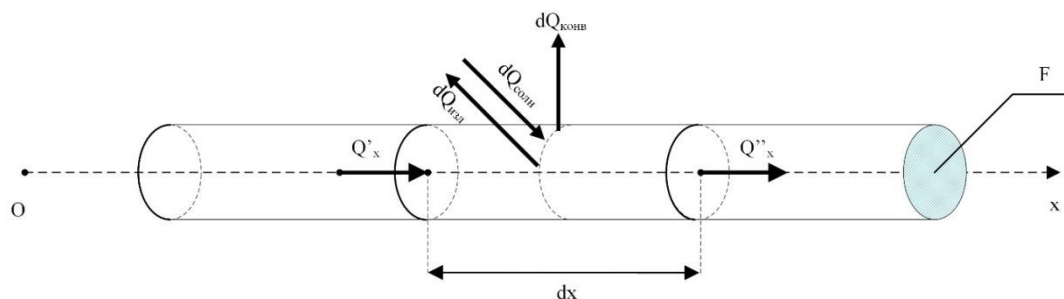


Рис. 1. Тепловой баланс участка провода
Fig. 1. Thermal balance of the wire section

⁸CIGRE 207. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.coipsi.com/2020/10/30/cigre-207-august-2002/> (22.03.2021).

⁹Араманович И. Г., Левин В. И. Уравнения математической физики: учеб. пособ. М.: Изд-во «Наука», 1969. 288 с.

¹⁰Идельчик В. И. Электрические системы и сети: учеб. для вузов. М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 1989. 592 с.

изменение температуры в проводе пренебрежимо мало. Тогда на основании законов Фурье, Джоуля-Ленца, Ньютона-Рихмана и Стефана-Больцмана можно записать следующие выражения:

$$Q'_x = -\lambda F \frac{\partial \Theta'}{\partial x}; \quad (2)$$

$$Q''_x = -\lambda F \frac{\partial \Theta''}{\partial x}; \quad (3)$$

$$dQ_{\text{выд}} = I^2 r_0 (1 + \alpha \Theta) dx; \quad (4)$$

$$dQ_{\text{конв}} = 2\pi r \alpha_m (\Theta - \Theta_{\text{окр}}) dx; \quad (5)$$

$$dQ_{\text{изл}} = 2\pi r \varepsilon_n C_0 (T^4 - T_{\text{окр}}^4) dx; \quad (6)$$

где λ – коэффициент теплопроводности провода, Вт/(м·°С); F и r – сечение и радиус провода, мм² и мм, соответственно; Θ и $\Theta_{\text{окр}}$ – температуры провода и окружающей среды, °С; I – сила электрического тока, А; r_0 – погонное активное сопротивление провода при 0°С, Ом/км; α – температурный коэффициент сопротивления, 1/°С; α_m – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м·°С); ε_n – степень черноты поверхности провода; $C_0 = 5,67 \cdot 10^8$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная излучения абсолютно черного тела; T и $T_{\text{окр}}$ – абсолютные температуры провода и окружающей среды, К. Штрих и два штриха в правых частях формул (2) и (3) обозначают производную температуры, соответственно, на левой и правой границах участка провода.

Перейдем в уравнении (1) от дифференциалов к производным. Тогда с использованием выражений (2)–(6) получим:

$$\begin{aligned} \lambda F \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + I^2(x) r_0 (1 + \alpha \Theta) + \frac{\partial Q_{\text{солн}}}{\partial x} = \\ = 2\pi r \alpha_m (\Theta - \Theta_{\text{окр}}) + \\ + 2\pi r \varepsilon_n C_0 (T^4 - T_{\text{окр}}^4) + C_n \frac{\partial \Theta}{\partial t}, \end{aligned} \quad (7)$$

где C_n – погонная теплоемкость провода (теплоемкость на единицу длины), Дж/(м·°С); t – время, с.

Уравнение (7) представляет собой уравнение теплопроводности неизолированного провода для осевой передачи тепла. По сути оно представляет собой частный случай уравнения теплопроводности тонкого стержня, рассмотренного в¹⁰ [18, 19] и других источниках. Специфика уравнения (7) состоит в том, что в нем конкретизированы способы охлаждения провода и учтена зависимость тепловыделения от температуры, обусловленная температурной зависимостью электрического сопротивления. Кроме того, ток в проводе записан как функция координаты.

Ниже будет рассмотрен только установившийся режим провода, когда последнее слагаемое в правой части (7) равно нулю. В этом случае уравнение (7) будет представлять собой обыкновенное нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка, которое может быть решено только численными методами. Однако представляет интерес также приближенное аналитическое решение, удобное для оценки пространственных масштабов изменения температуры и влияния граничных условий на ее распределение. Для получения этого решения примем $I(x) = \text{const}$ и введем коэффициент теплопередачи a_{mn} , позволяющий учесть конвекцию и излучение в одинаковой форме:

$$a_{mn} = \alpha_m + \varepsilon_n C_0 \frac{T^4 - T_{\text{окр}}^4}{\Theta - \Theta_{\text{окр}}}. \quad (8)$$

Кроме того, чтобы избежать излишней громоздкости выражений, не будем учитывать солнечную радиацию. При этих упрощениях уравнение теплопроводности примет следующий вид:

$$\lambda F \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + I^2 r_0 (1 + \alpha \Theta) = 2\pi r a_{mn} (\Theta - \Theta_{\text{окр}}). \quad (9)$$

Согласно формуле (8), коэффициент теплопередачи зависит от температуры. Однако чтобы получить аналитическое решение, требуется приближенно принять $a_{mn} = \text{const}$.

Для этого можно подставить в формулу (8) некоторые фиксированные температуры, соответствующие реальным условиям эксплуатации линии электропередачи. Альтернативный способ состоит в том, чтобы рассчитать коэффициент теплопередачи через параметры какого-либо известного температурного режима. В качестве такого режима удобно использовать режим максимально допустимого тока $I_{доп}$, при котором провод нагревается до максимально допустимой температуры $\Theta_{доп}$ (при отсутствии осевой передачи тепла). Подставив параметры этого режима в уравнение (9) и разрешив его относительно $a_{мп}$, получим расчетное выражение:

$$a_{мп} = \frac{I_{доп}^2 r_0 (1 + \alpha \Theta_{доп})}{2\pi r (\Theta_{доп} - \Theta_{окр})}. \quad (10)$$

Приближенное аналитическое решение уравнения теплопроводности неизолированного провода. Применяя к уравнению (9) метод вариации произвольных постоянных, получим его решение в виде:

$$\begin{aligned} \Theta(x) &= C'e^{x/L_T} + C''e^{-x/L_T} + \Theta_{\delta} = \\ &= C'e^{x/L_T} e^{-\frac{L-x}{L_T}} + C''e^{-x/L_T} + \Theta_{\delta}, \end{aligned} \quad (11)$$

где C' и C'' – постоянные интегрирования; L_T – тепловой масштаб длины, м; Θ_{δ} – температура неограниченно длинного провода (частное решение уравнения (9) при $\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} = 0$), °C; L – длина линии, м.

Параметры L_T и Θ_{δ} определяются по формулам:

$$L_T = \sqrt{\frac{\lambda F}{2\pi r a_{мп} - I^2 r_0 \alpha}}; \quad (12)$$

$$\Theta_{\delta} = \frac{I^2 r_0 + 2\pi r a_{мп} \Theta_{окр}}{2\pi r a_{мп} - I^2 r_0 \alpha}. \quad (13)$$

Параметр Θ_{δ} в формуле (11) представ-

ляет собой постоянную величину. Ниже, при анализе результатов численных расчетов, используется аналогичный параметр, но уже как функция длины. В связи с этим его обозначение изменено на $\Theta_{\delta, var}$.

Для нахождения постоянных интегрирования зададим граничные условия в форме температур в начале и в конце линии $\Theta_{\varepsilon 1} = \Theta(0)$ и $\Theta_{\varepsilon 2} = \Theta(L)$. Тогда

$$C' = \frac{\Theta_{\varepsilon 2} - \Theta_{\delta} - (\Theta_{\varepsilon 1} - \Theta_{\delta}) e^{-L/L_T}}{e^{L/L_T} - e^{-L/L_T}}; \quad (14)$$

$$C'' = \frac{\Theta_{\delta} - \Theta_{\varepsilon 2} - (\Theta_{\delta} - \Theta_{\varepsilon 1}) e^{L/L_T}}{e^{L/L_T} - e^{-L/L_T}}. \quad (15)$$

Введем обозначения $C_1 = C'e^{L/L_T}$, $C_2 = C''$. Тогда, разделив числитель и знаменатель в формулах (14) и (15) на e^{L/L_T} , запишем решение уравнения (9) и постоянные интегрирования в виде:

$$\Theta(x) = C_1 e^{-\frac{L-x}{L_T}} + C_2 e^{-x/L_T} + \Theta_{\delta}; \quad (16)$$

$$C_1 = \frac{\Theta_{\varepsilon 2} - \Theta_{\delta} - (\Theta_{\varepsilon 1} - \Theta_{\delta}) e^{-L/L_T}}{1 - e^{-2L/L_T}}; \quad (17)$$

$$C_2 = \frac{\Theta_{\varepsilon 1} - \Theta_{\delta} - (\Theta_{\varepsilon 2} - \Theta_{\delta}) e^{-L/L_T}}{1 - e^{-2L/L_T}}. \quad (18)$$

При $L \gg L_T$ формулы (16)–(18) преобразуются к приближенному выражению:

$$\begin{aligned} \Theta(x) &\approx (\Theta_{\varepsilon 2} - \Theta_{\delta}) e^{-\frac{L-x}{L_T}} + \\ &+ (\Theta_{\varepsilon 1} - \Theta_{\delta}) e^{-x/L_T} + \Theta_{\delta}. \end{aligned} \quad (19)$$

Из формулы (19) видно, что при $L \gg L_T$ величина L_T имеет четкий физический смысл: тепловой масштаб длины – это расстояние,

при перемещении на которое от начала (конца) к середине линии разность между температурой в начале (конце) линии и температурой неограниченно длинного провода уменьшается в e раз.

Тепловой масштаб длины определяет степень влияния граничных условий на среднюю и максимальную температуры провода. Если выполняются условия:

$$\Theta_{\partial} > \Theta_{e1} \text{ и } \Theta_{\partial} > \Theta_{e2}, \quad (20)$$

то граничные условия на среднюю температуру будут влиять сильнее, чем на максимальную.

Интегрируя (16) с учетом (17) и (18), можно получить следующее выражение для средней температуры провода:

$$\Theta_{cp} = \Theta_{\partial} + (\Theta_{e1} + \Theta_{e2} - 2\Theta_{\partial}) \frac{L_T}{L} \frac{(1 - e^{-L/L_T})^2}{1 - e^{-2L/L_T}}. \quad (21)$$

Дифференцируя (16) по x и приравнявая производную к нулю, можно получить выражение для координаты x_0 , при котором температура переходит через экстремум:

$$x_0 = \frac{1}{2} \left[L + L_T \ln \left(\frac{\Theta_{e1} - \Theta_{\partial} - (\Theta_{e2} - \Theta_{\partial}) e^{-L/L_T}}{\Theta_{e2} - \Theta_{\partial} - (\Theta_{e1} - \Theta_{\partial}) e^{-L/L_T}} \right) \right]. \quad (22)$$

Если выполняются условия (20), то экстремум представляет собой точку максимума. Тогда максимальная температура провода $\Theta_{max} = \Theta(x_0)$. В противном случае максимальная температура будет равна наибольшему из значений Θ_{e1} , Θ_{e2} .

Будем считать влияние граничных условий на среднюю температуру несущественным, если $|\Theta_{cp} - \Theta_{\partial}| \leq 1^{\circ}\text{C}$. Соответствующее значение $L^* = L/L_T$ можно найти из уравнения:

$$L^* \frac{1 - e^{-2L^*}}{(1 - e^{-L^*})^2} = |\Theta_{e1} + \Theta_{e2} - 2\Theta_{\partial}|. \quad (23)$$

При $L^* > 6$ о.е. дробь в левой части (23) отличается от единицы менее чем на 1%. В результате уравнение (23) преобразуется к простому численному соотношению вида:

$$L^* = |\Theta_{e1} + \Theta_{e2} - 2\Theta_{\partial}|. \quad (24)$$

Для проводов стандартных конструкций температура Θ_{∂} в длительных режимах может достигать 90°C , а для проводов нового поколения – до 250°C . Для наибольшего контраста с этими значениями примем заведомо низкие граничные температуры $\Theta_{e1} = \Theta_{e2} = -20^{\circ}\text{C}$. При этих условиях для проводов стандартных конструкций получим $L^* = 220$ о.е., а для проводов нового поколения – $L^* = 540$ о.е.

Таким образом, если длина линии превышает $(200...500)L_T$, то граничные условия перестают влиять на ее температурный режим.

Из формулы (12) следует, что тепловой масштаб длины зависит прежде всего от сечения линии и протекающего тока. На рис. 2 приведены зависимости $L_T(l)$ для проводов марок AC и G(Z)TACSR различных сечений. При токах ниже допустимого кривые показаны сплошными линиями, а выше допустимого – штриховыми. Зависимости построены при следующих параметрах: температурный коэффициент сопротивления $\alpha = 0,00403 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$; коэффициент теплопроводности $\lambda = 237 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$; температура окружающей среды, к которой приведены допустимые токи (формула (10)), $+25^{\circ}\text{C}$; фактическая температура окружающей среды (формула (13)) -20°C ; граничные условия $\Theta_{e1} = \Theta_{e2} = -20^{\circ}\text{C}$. Параметры проводов приведены в табл. 1.

Видно, что при изменении тока от нуля до $I_{доп}$ тепловой масштаб длины меняется незначительно и для всех рассмотренных сечений остается в пределах $10...30$ см. Это значит, что если длина линии превышает 150 м и выполняются условия (20), то при токах не выше допустимого граничные условия не влияют на тепловой режим линии. Указанное значение длины относится прежде всего к линиям повышенной пропускной способности. У стандартных линий оно еще ниже.

Таблица 1. Параметры проводов
 Table 1. Wire parameters

Наименование и обозначение параметра	АС*-35/6,2	АС-70/11	АС-150/19	АС-240/32	АС-400/51	G(Z)TACSR**-240	СИП***-2 3x95+1x95
Погонное активное сопротивление при 0 °С r_0 , Ом/км	0,719	0,3903	0,1893	0,1094	0,06783	0,1101	0,3016
Сечение токоведущей части провода F , мм ²	35	70	150	240	400	248,4	95
Радиус металлической части провода r , мм	4,2	5,7	8,4	10,8	13,8	10,3	5,5
Допустимый ток $I_{доп}$, А	175	265	450	605	825	1190	300
Допустимая температура $\Theta_{доп}$, °С	70					210	90

*АС – провод неизолированный сталеалюминиевый / AS – non-insulated steel-aluminum wire;

**G(Z)TACSR – провод неизолированный для высоковольтных линий электропередачи термостойкий со стальным сердечником и с зазором / G(Z)TACSR – non-insulated heat-resistant wire with a steel core and a gap for high-voltage power lines;

***СИП – самонесущий изолированный провод / SSIW – self-supporting insulated wire

При сверхдопустимых токах рост теплового масштаба длины ускоряется. Однако расчет средней температуры при таких условиях не имеет практического смысла. Поэтому тепловой режим определяется максимальной температурой. Влияние граничных условий на максимум температуры примерно на порядок меньше, чем на среднюю температуру. Поэтому при сверхдопустимых, но не аварийных токах влияние граничных условий на тепловой режим с практической точки зрения проявляется еще на меньших длинах, чем при токах ниже допустимого.

Неограниченный рост теплового масштаба длины начинается только при токах аварийного уровня.

Примеры численного решения уравнения теплопроводности с учетом изменения тока по длине. Наличие у линий емкостной проводимости приводит к тому, что ток в линии непрерывно изменяется по длине. Это приводит к возникновению осевых градиентов температуры не только вблизи границ, но и на всех внутренних участках линии. На рис. 3 приведены результаты численного решения уравнения теплопроводности (9) методом конечных разностей (МКР) для линии АС-240/32 напряжением 220 кВ и длиной 75 км при граничных условиях $\Theta_{e1} = \Theta_{e2} = +30^\circ\text{C}$ и температуре окружающей среды $\Theta_{окр} = -20^\circ\text{C}$. Изменение тока задано функцией:

$$i(x) = i_2 \operatorname{ch}(\gamma x) + \frac{U_2}{\sqrt{3}Z_c} \operatorname{sh}(\gamma x), \quad (25)$$

где i_2, U_2 – ток и напряжение в конце линии, кА и кВ, соответственно; $\gamma = 0,0001345 + j0,001074$ – коэффициент распространения электромагнитной волны, 1/км; $Z_c = 406,78 - j50,935$ – волновое сопротивление, Ом.

Нагрузки в конце линии $P = 240$ МВт, $Q = 175$ МВ·Ар. Ток возрастает от 839,6 А в начале линии, до 855,6 А – в конце.

На рис. 3 приведена зависимость $\Theta_{d, var}(x)$, построенная по формуле (13), а также результаты аналитического решения (16) для среднеквадратичного тока, равного 848,1 А. Среднеквадратичный ток был рассчитан путем интегрирования (25):

$$I_{ck} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L i^2(x) dx}. \quad (26)$$

Причиной изменения тока по длине линии может быть также подключение промежуточных нагрузок. При большом числе таких подключений для линии может быть использована модель равномерно распределенной нагрузки [20]. На рис. 4 приведен пример численного решения уравнения теплопроводности для линии СИП-2 3x95+1x95 длиной 200 м и напряжением 380 В при-

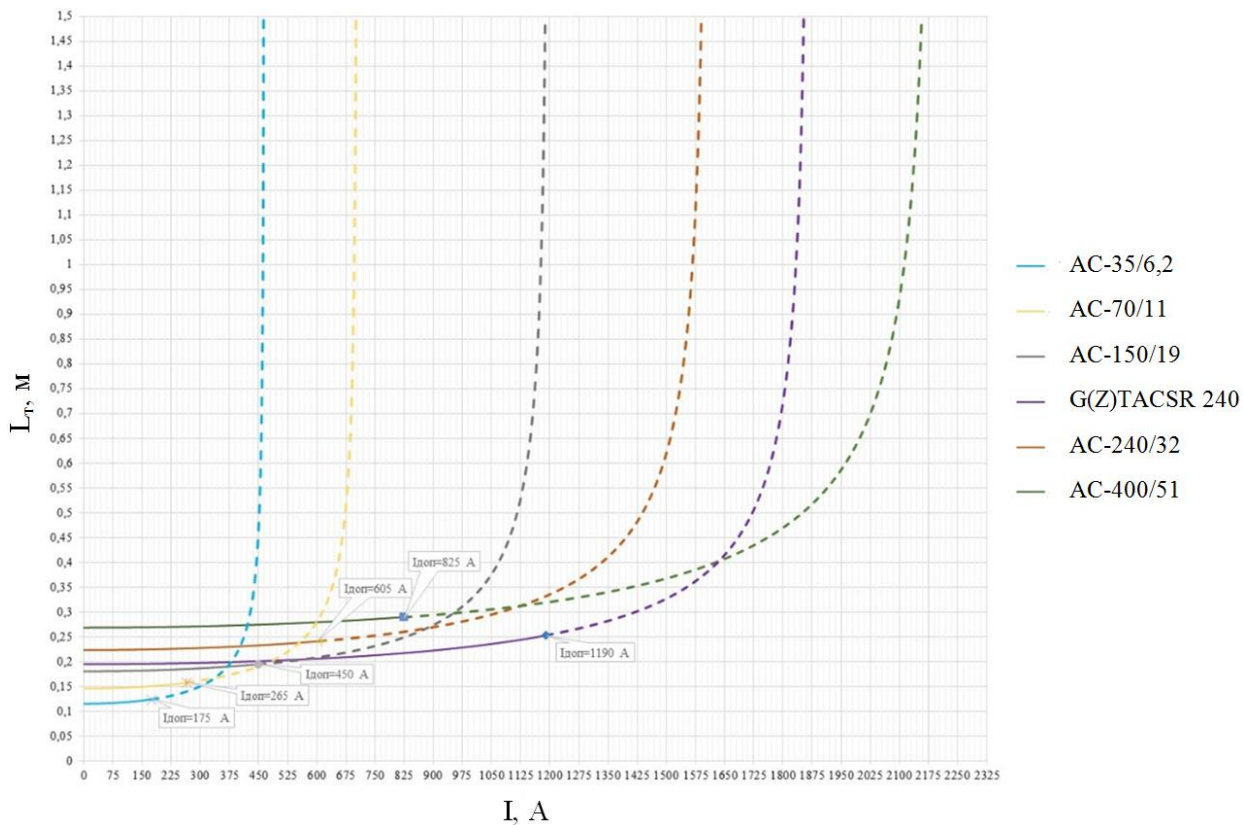


Рис. 2. Зависимости теплового масштаба длины от тока нагрузки
Fig. 2. Thermal scale of the length vs load current

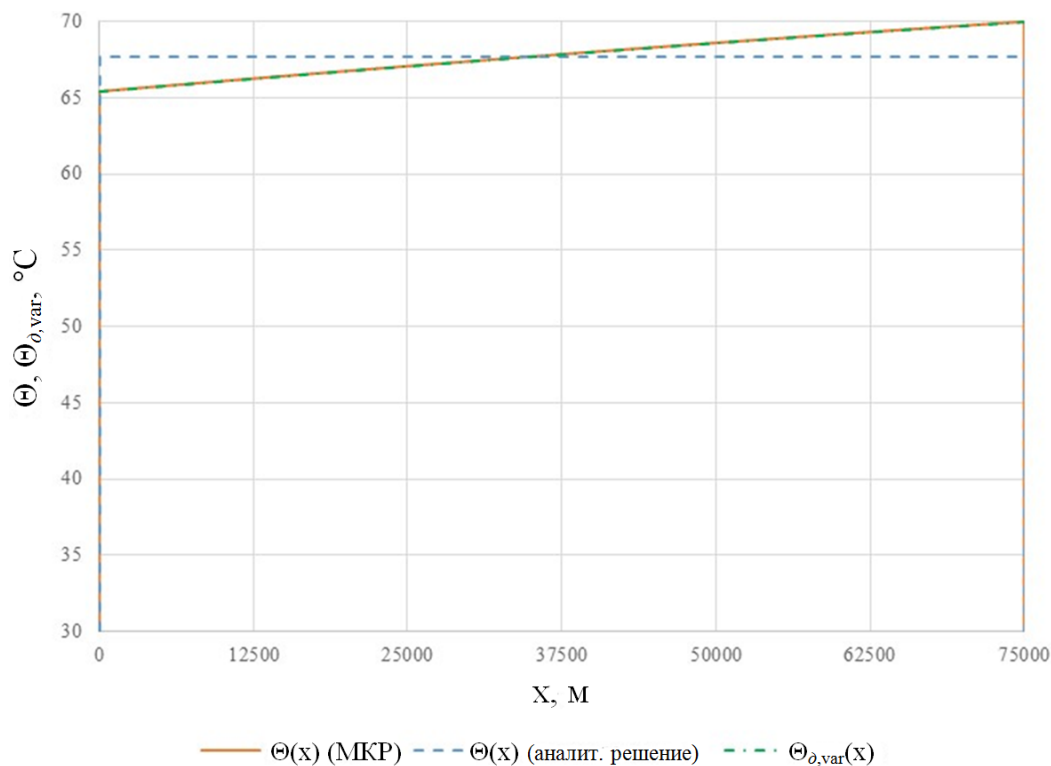


Рис. 3. Распределение температуры провода по длине линии для AC-240
Fig. 3. Wire temperature distribution along the line length for AC-240

граничных условиях $\Theta_{\partial 1} = \Theta_{\partial 2} = -20^{\circ}\text{C}$ и температуре окружающей среды $\Theta_{\text{окр}} = -20^{\circ}\text{C}$ (параметры провода приведены в табл. 1). За счет присоединения промежуточных электроприемников ток возрастает от 20 А в конце линии, до 390 А – в начале. Среднеквадратичный ток равен 231,16 А. Поскольку коэффициент теплопроводности изоляции на 2-3 порядка меньше коэффициента теплопроводности алюминия, то при расчете было принято допущение, что изоляция не участвует в передаче тепла вдоль линии.

В табл. 2 представлены результаты расчета максимальной температуры Θ_{max} и потерь активной мощности в линии ΔP для случаев, соответствующих рис. 3 и рис. 4.

Расчеты на основе аналитического решения при среднеквадратичном токе предполагают, что осевые потоки тепла в линии, за исключением ее границ, отсутствуют. Причиной этого является равномерное распределение тепловыделения. Однако тот же результат (без учета границ линии) может быть получен и для реального распределения тепловыделения, но при бесконечно большой теплопроводности.

Расчеты по зависимости $\Theta_{\partial, \text{var}}(x)$ также предполагают отсутствие осевых потоков тепла, но по противоположной причине: зависимость $\Theta_{\partial, \text{var}}(x)$ соответствует бесконечно малой теплопроводности линии.

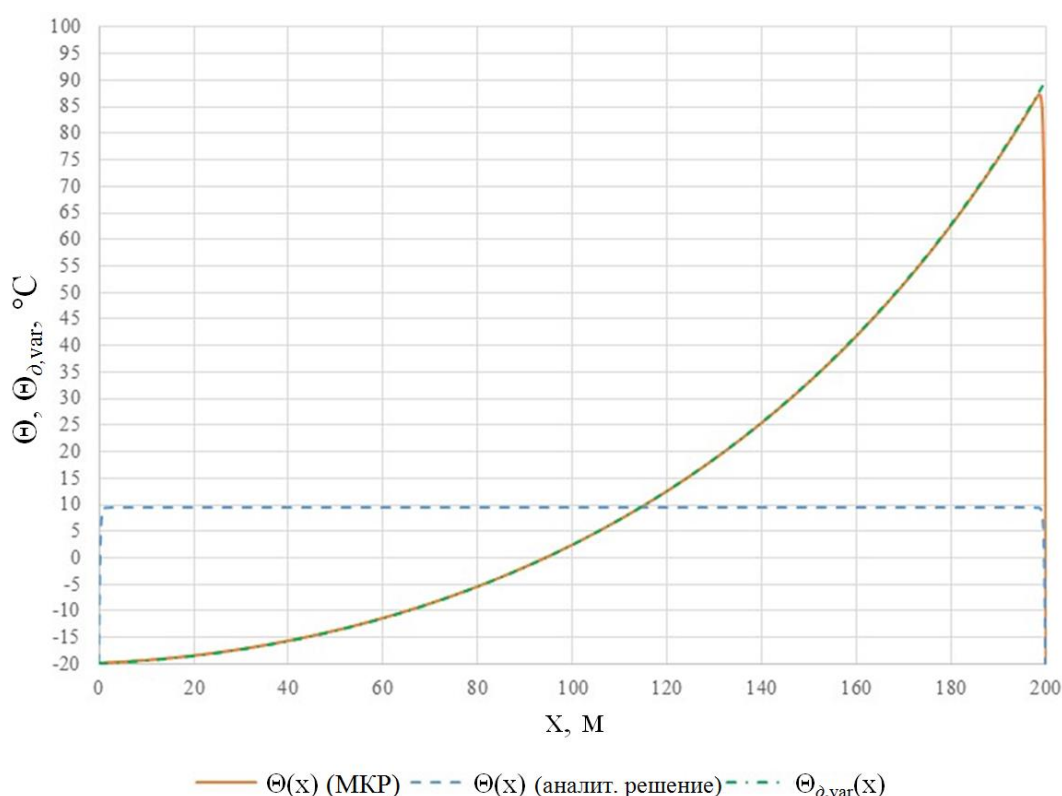


Рис. 4. Распределение температуры провода по длине линии для СИП-2 3x95+1x95
 Fig. 4. Wire temperature distribution along the line length for a self-supporting insulated wire SSIW-2 3x95+1x95

Таблица 2. Максимальные температуры и потери активной мощности в линиях
 Table 2. Maximum temperatures and active power losses in lines

Марка провода	Аналитическое решение при среднеквадратичном токе		Метод конечных разностей		По зависимости $\Theta_{\partial, \text{var}}(x)$	
	$\Theta_{\text{max}}, ^{\circ}\text{C}$	$\Delta P, \text{кВт}$	$\Theta_{\text{max}}, ^{\circ}\text{C}$	$\Delta P, \text{кВт}$	$\Theta_{\text{max}}, ^{\circ}\text{C}$	$\Delta P, \text{кВт}$
АС-240/32	67,8	22540	70	22540	70	22540
СИП-2 3x95+1x95	9,4	10,03	87,3	11,15	89,8	11,16

В действительности при фактическом коэффициенте теплопроводности и неравномерном распределении тока (тепловыделения) реализуется промежуточный вариант, рассчитанный методом конечных разностей. Из табл. 2 видно, что для линии АС-240/32 при изменении тока, обусловленном влиянием емкости линии, потери мощности при расчете всеми тремя способами получились одинаковыми. Это объясняется сравнительно небольшим изменением тока по длине. Максимальные температуры различаются, но не очень существенно.

В линии с равномерно распределенной нагрузкой при большом изменении тока по длине аналитическое решение, метод конечных разностей и расчет по зависимости $\Theta_{\partial, var}(x)$ дают существенно отличающиеся результаты. Особенно большие погрешности (по сравнению с методом конечных разностей) дает аналитическое решение: абсолютная погрешность по максимальной температуре составляет $77,9^{\circ}\text{C}$, а относительная погрешность по потерям равна 10%. Аналогичные погрешности расчета по зависимости $\Theta_{\partial, var}(x)$ значительно меньше: $2,5^{\circ}\text{C}$ и 0,1%. Следовательно, несмотря на высокую теплопроводность металла, модель с нулевой теплопроводностью по оси провода дает наиболее точные результаты, чем модель с бесконечно большой теплопроводностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты моделирования процессов распространения тепла по оси проводов линий электропередачи показали, что граничные условия в начале и в конце линии оказы-

вают влияние на ее температуру лишь в пределах нескольких метров. Степень этого влияния несколько возрастает с увеличением тока вследствие температурной зависимости тепловыделения, но остается малой вплоть до токов аварийного уровня.

2. Потери активной мощности, определяемые с учетом температурной зависимости сопротивления, определяются совокупностью температур во всех точках линии, в том числе на ее границах. Поэтому влияние граничных условий на потери проявляется при большей протяженности линий – до 150 м.

3. В реальных условиях ток изменяется по длине линии под влиянием емкостной проводимости и при подключении промежуточных нагрузок. Точный расчет температурного режима линии с учетом изменения тока по длине возможен только на основе численного решения уравнения теплопроводности.

4. Результаты численных расчетов показали, что пропускная способность линии по нагреву определяется не осредненным по длине током, а точечным максимумом тока в линии. Температура в линии под влиянием осевых потоков тепла почти не выравнивается, несмотря на высокую теплопроводность металла.

5. Потери активной мощности по этой же причине определяются не средней температурой линии, а совокупностью значений температур и токов в разных точках линии. Однако если ток меняется только под действием емкостной проводимости, то влияние этого изменения на потери оказывается несущественным, и потери активной мощности можно рассчитывать через среднеквадратичный ток.

Список источников

1. Гиршин С. С., Троценко В. М., Горюнов В. Н., Кропачин О. В., Шепелев А. О., Ткаченко В. А., Упрощенная формула для нагрузочных потерь активной мощности в линиях электропередачи с учетом температуры // Омский научный вестник. 2018. № 6. С. 41–49. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-162-41-49>.
2. Воронцов В. Э., Туркина О. В. Оценка погрешностей расчета переменных потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучета метеоусловий // Электрические станции. 2008. № 10. С. 42–49.
3. Гиршин С. С., Шепелев А. О. Разработка усовершен-

ствованных методов расчета установившихся режимов электроэнергетических систем с учетом температурной зависимости активных сопротивлений ВЛ // Электрические станции. 2019. № 11. С. 44–54.
4. Зарудский Г. К., Шведов Г. В., Азаров А. Н., Самалюк Ю. С. Оценка влияния метеорологических условий на активное сопротивление проводов воздушных линий электропередачи // Вестник Московского энергетического института. 2014. № 3. С. 35–39.
5. Баламетов А. Б., Халилов Э. Д. Моделирование режимов электрических сетей на основе уравнений

установившегося режима и теплового баланса // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2020. Т. 63. № 1. С. 66–80. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-66-80>.

6. Girshin S. S., Bubenchikov A. A., Bubenchikova T. V., Goryunov V. N., Osipov D. S. Mathematical model of electric energy losses calculating in crosslinked four-wire polyethylene insulated (XLPE) aerial bundled cables // Elektro: Proceedings Conferences (Strbske Pleso, 16–18 May 2016). Strbske Pleso: IEEE, 2016. P. 294–298. <https://doi.org/10.1109/ELEKTRO.2016.7512084>.

7. Bigun A. A. Y., Girshin S. S., Goryunov V. N., Shepelev A. O., Prus S. Yu., Tkachenko V. A. Assessment of climatic factors influence on the time to reach maximum wire temperature of overhead power lines // Przegląd Elektrotechniczny. 2020. No. 96. P. 39–42. <https://doi.org/10.15199/48.2020.08.08>.

8. Воротницкий В. Э., Могиленко А. В. Снижение потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта. Часть 1. Структура потерь. Сравнительный анализ динамики потерь в электрических сетях различных стран. Регуляторные мероприятия по снижению потерь // Библиотечка электротехника (Приложение к журналу «Энергетик»). 2021. № 4-5. С. 1–144. <https://doi.org/10.34831/EP.2021.268.4.001>.

9. Urbanský J, Špes M, Beňa L., Pál D. Determination of overhead power lines ampacity based on CIGRE 207 brochure // Elektroenergetika: Proceedings the 10th International Scientific Symposium (Stará Lesná, 16–18 September). Stará Lesná, 2019. P. 474–478. <https://doi.org/10.1109/EPE.2019.8778173>.

10. Kanalik M., Margitova A., Beňa L. Temperature calculation of overhead power line conductors based on CIGRE technical brochure 601 in Slovakia // Electrical Engineering. 2019. Vol. 101. Iss. 3. P. 921–933. <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00831-8>.

11. Albizu I., Fernandez E., Alberdi R., Bedialauneta M. T., Mazon A. J. Adaptive static line rating for systems with HTLS conductors // IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. Vol. 33. Iss. 6. P. 2849–2855. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2855805>.

12. Alvarez D. L., Da Silva F. F., Bak C. L., Mombello E. E., Rosero J. A., Olason D. L. Methodology to assess phasor measurement unit in the estimation of dynamic line rating // IET Generation, Transmission & Distribution. 2018. No. 12.

P. 3820–3828. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0661>.

13. Maksić M., Djurica V., Souvent A., Slak J., Depolli M., Kosec G. Cooling of overhead power lines due to the natural convection // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. Vol. 113. P. 333–343. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.005>.

14. Sun Xiaorong, Jin Chenhao. Spatio-temporal weather model-based probabilistic forecasting of dynamic thermal rating for overhead transmission lines // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2022. Vol. 134. P. 107347. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107347>.

15. Talpur S., Lie T. T., Zamora R. Non-steady state electro-thermally coupled weather-dependent power flow technique for a geographically-traversed overhead-line capacity improvement // Electric Power Systems Research. 2019. Vol. 177. P. 106017. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106017>.

16. Abboud A. W., Gentle J. P., Mcjunkin T. R., Lehmer J. P. Using computational fluid dynamics of wind simulations coupled with weather data to calculate dynamic line ratings // IEEE Transactions on Power Delivery. 2020. Vol. 35. Iss. 2. P. 745–753. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2925520>.

17. Douglass D. A., Gentle J., Nguyen H.-M., Chisholm W., Xu Charles, Goodwin T., et al. A review of dynamic thermal line rating methods with forecasting // IEEE Transactions on Power Delivery. 2019. Vol. 34. Iss. 6. P. 2100–2109. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2932054>.

18. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел / пер. с англ. А.А. Померанцева. М.: Изд-во «Наука», 1964. 488 с.

19. Гиршин С. С., Андреева Е. Г., Хацевский К. В., Троценко В. М., Мельников Н. А., Петрова Е. В., Горюнов В. Н. Управление мощностью регулируемых конденсаторов в электрических сетях по критерию минимума потерь энергии // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 741–752. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-741-752>.

20. Girshin S. S., Bigun A. Ay., Ivanova E. V., Petrova E. V., Goryunov V. N., Shepelev A. O. The grid element temperature considering when selecting measures to reduce energy losses on the example of reactive power compensation // Przegląd Elektrotechniczny. 2018. Vol. 94. No. 8. P. 101–104. <https://doi.org/10.15199/48.2018.08.24>.

References

1. Goryunov V. N., Kropotin O. V., Shepelev A. O., Tkachenko V. A., Girshin S. S., Trotsenko V. M. Simplified formulae for active power load losses in power transmission lines taking into account temperature. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2018;6:41-49. (In Russ.).

2. Vorotnickij V. E., Turkina O. V. Estimation of errors in overhead line power variable losses calculation due to failure to take into account weather conditions. *Elektricheskie stantsii = Power Technology and Engineer-*

ing. 2008;10:42-49. (In Russ.).

3. Girshin S. S., Shepelev A. O. Development of improved methods for calculating steady-state modes of power systems taking into account the temperature dependence of the active resistances of overhead transmission lines. *Elektricheskie stantsii = Power Technology and Engineering*. 2019;11:44-54. (In Russ.).

4. Zarudskiy G. K., Shvedov G. V., Azarov A. N., Samalyuk Yu. S. Evaluation of influence of meteorological factors on ohmic resistance of conductors of overhead power

- transmission line. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta = Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2014;3:35-39. (In Russ.)
5. Balametov A. B., Halilov E. D. Simulation of electric networks modes using steady-state and heat balance equations. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij i energeticheskikh ob'edinenij SNG. Energetika = Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2020;63;1:66-80. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-66-80>. (In Russ.)
6. Girshin S. S., Bubenchikov A. A., Bubenchikova T. V., Goryunov V. N., Osipov D. S. Mathematical model of electric energy losses calculating in crosslinked four-wire polyethylene insulated (XLPE) aerial bundled cables. In: *Elektr: Proceedings Conferences*. 16–18 May 2016, Strbske Pleso. Strbske Pleso: IEEE; 2016, p. 294-298. <https://doi.org/10.1109/ELEKTRO.2016.7512084>.
7. Bigun A. A. Y., Girshin S. S., Goryunov V. N., Shepelev A. O., Prus S. Yu., Tkachenko V. A. Assessment of climatic factors influence on the time to reach maximum wire temperature of overhead power lines. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2020;96:39-42. <https://doi.org/10.15199/48.2020.08.08>.
8. Vorotnitskij V. E., Mogilenko A. V. Reducing power losses in distribution electrical networks: a comparative analysis of foreign and domestic experience. Part 1. Structure of losses. Comparative analysis of loss dynamics in electric networks of various countries. Regulatory measures to reduce losses. *Bibliotekha elektrotehnika (Prilozhenie k zhurnalu «Energetik»)*. 2021;4-5:1-144. <https://doi.org/10.34831/EP.2021.268.4.001>. (In Russ.)
9. Urbanský J, Špes M, Beňa L, Pál D. Determination of overhead power lines ampacity based on CIGRE 207 brochure. In: *Elektroenergetika: Proceedings the 10th International Scientific Symposium*. 16–18 September, Stará Lesná. Stará Lesná; 2019, p. 474-478. <https://doi.org/10.1109/EPE.2019.8778173>.
10. Kanalik M., Margitova A., Beňa L. Temperature calculation of overhead power line conductors based on CIGRE technical brochure 601 in Slovakia. *Electrical Engineering*. 2019;101(3):921-933. <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00831-8>.
11. Albizu I., Fernandez E., Alberdi R., Bedialauneta M. T., Mazon A. J. Adaptive static line rating for systems with HTLS conductors. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018;33(6):2849-2855. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2855805>.
12. Alvarez D. L., Da Silva F. F., Bak C. L., Mombello E. E., Rosero J. A., Olason D. L. Methodology to assess phasor measurement unit in the estimation of dynamic line rating. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2018;12:3820-3828. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0661>.
13. Maksić M., Djurica V., Souvent A., Slak J., Depolli M., Kosec G. Cooling of overhead power lines due to the natural convection. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019;113:333-343. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.005>.
14. Sun Xiaorong, Jin Chenhao. Spatio-temporal weather model-based probabilistic forecasting of dynamic thermal rating for overhead transmission lines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022;134:107347. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107347>.
15. Talpur S., Lie T. T., Zamora R. Non-steady state electro-thermally coupled weather-dependent power flow technique for a geographically-traversed overhead-line capacity improvement. *Electric Power Systems Research*. 2019;177:106017. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106017>.
16. Abboud A. W., Gentle J. P., Mcjunkin T. R., Lehmer J. P. Using computational fluid dynamics of wind simulations coupled with weather data to calculate dynamic line ratings. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020;35(2):745-753. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2925520>.
17. Douglass D. A., Gentle J., Nguyen H.-M., Chisholm W., Xu Charles, Goodwin T., et al. A review of dynamic thermal line rating methods with forecasting. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2019;34(6):2100-2109. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2932054>.
18. Carslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of heat in solids, 1964. 488 p. (Russ. ed.: *Teploprovodnost' tverdyh tel*, Moscow, Nauka; 1964, 488 p.)
19. Girshin S. S., Andreeva E. G., Khatsevskiy K. V., Trotsenko V. M., Melnikov N. A., Petrova E. V., Goryunov V. N. Power management of variable capacitors in electrical grid systems according to the criterion of minimum energy loss. *iPolytech Journal*. 2021;25(6):741-752. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-741-752>.
20. Girshin S. S., Bigun A. Ay., Ivanova E. V., Petrova E. V., Goryunov V. N., Shepelev A. O. The grid element temperature considering when selecting measures to reduce energy losses on the example of reactive power compensation. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2018;94(8):101-104. <https://doi.org/10.15199/48.2018.08.24>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Троценко Владислав Михайлович,
старший преподаватель кафедры электроснабжения
промышленных предприятий,
Энергетический институт,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladislav M. Trotsenko,
Senior Lecturer of the Department of Power Supply of
Industrial Enterprises,
Energy Institute,
Omsk State Technical University,
11 Mira pr., Omsk 644050, Russia

Гиршин Станислав Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электроснабжения промышленных
предприятий,
Энергетический институт,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

Петрова Елена Владимировна,
старший преподаватель кафедры электроснабжения
промышленных предприятий,
Энергетический институт,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

Сидоров Олег Алексеевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электроснабжения
железнодорожного транспорта,
Омский государственный университет путей
сообщений,
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35, Россия

Румянцева Евгения Викторовна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры электроснабжения
промышленных предприятий,
Энергетический институт,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

Жиленко Елена Петровна,
старший преподаватель кафедры
электроснабжения промышленных предприятий,
Энергетический институт,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

Горюнов Владимир Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой электроснабжения
промышленных предприятий,
Энергетический институт,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 15.02.2022; одобрена после рецензирования 26.04.2022; принята к публикации 19.07.2022.

Stanislav S. Girshin,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Power Supply
of Industrial Enterprises,
Energy Institute,
Omsk State Technical University,
11 Mira pr., Omsk 644050, Russia

Elena V. Petrova,
Senior Lecturer of the Department of Power Supply of
Industrial Enterprises,
Energy Institute,
Omsk State Technical University,
11 Mira pr., Omsk 644050, Russia

Oleg A. Sidorov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Railway Transport Power
Supply,
Omsk State Transport University,
35 Marksa pr., Omsk 644046, Russia

Evgeniya V. Rumyantseva,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Power Supply
of Industrial Enterprises,
Energy Institute,
Omsk State Technical University,
11 Mira pr., Omsk 644050, Russia

Elena P. Zhilenko,
Senior Lecturer of the Department of Power Supply of
Industrial Enterprises,
Energy Institute,
Omsk State Technical University,
11 Mira pr., Omsk 644050, Russia

Vladimir N. Goryunov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Power Supply of Industrial
Enterprises,
Energy Institute,
Omsk State Technical University,
11 Mira pr., Omsk 644050, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 15.02.2022; approved after reviewing 26.04.2022; accepted for publication 19.07.2022.



Научная статья

УДК 669.347

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-532-544>

Идентификация короткого замыкания электродов по тепловому излучению при электролитическом рафинировании меди

Владимир Юрьевич Бажин^{1✉}, Хю Хоанг Нгуен²^{1,2} Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия¹ bazhin-alfoil@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>² huyhoangmta45@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7025-8654>

Резюме. Цель – повышение эффективности контроля и автоматизированного управления технологическим состоянием электролитических ячеек при рафинировании меди путем распознавания и идентификации короткого замыкания между электродами. Для проведения экспериментальных работ использовался лабораторный стенд, состоящий из двух последовательно включенных в электрическую цепь ячеек. Метод обнаружения короткого замыкания основан на получении инфракрасного излучения с помощью сканирующего тепловизора (Optris PI 400i / PI 450i) при определении участков с высокими значениями температур поверхности электрода и электролита. Алгоритм обнаружения короткого замыкания был разработан и протестирован с помощью программного обеспечения MATLAB при использовании функций Image Processing Toolbox MATLAB. Предложен способ распознавания и идентификации (при помощи сканирующего цифрового тепловизора) короткого замыкания между электродами электролизной ячейки. Способ позволяет комплексно оценить площадь контакта, определить время начала замыкания и степень нагрева электродов в зоне короткого замыкания, установить значения температур на всех участках, включая и температуру электролита во всем объеме ячейки. Предложен алгоритм поиска мест коротких замыканий в электролизере, заключающийся в сборе и сопоставлении полученных данных для регулирования межэлектродного расстояния (обеспечивающего устойчивый энергетический режим всей электролизной серии) и определении точного положения каждого катода в ячейке с помощью пороговой обработки инфракрасных изображений, полученных тепловизором. Показано, что быстрая идентификация мест коротких замыканий в электролизере (с начала контакта между электродами) и регистрация скорости роста площади дендритного срастания и температуры электролита позволяют своевременно устранять технологические нарушения во время работы электролизной ванны. Таким образом, разработанный способ идентификации короткого замыкания для комплексного определения и распознавания общего технологического состояния электролизной ячейки при электролитическом рафинировании меди позволяет достигать устойчивого энергетического режима с минимальными отклонениями по температуре процесса.

Ключевые слова: электролитическое рафинирование меди, катодная медь, цифровой тепловизор, ИК-изображения, неразрушающий контроль, цифровой двойник

Благодарности: Данная работа выполнена на оборудовании Научного центра «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов» Санкт-Петербургского горного университета в рамках научного направления «Энергосберегающие технологии».

Для цитирования: Бажин В. Ю., Нгуен Хю Хоанг. Идентификация короткого замыкания электродов по тепловому излучению при электролитическом рафинировании меди // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 532–544. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-532-544>.

METALLURGY

Original article

Identification of electrode short circuits during the electrolytic refining of copper based on heat radiation

Vladimir Yu. Bazhin^{1✉}, Huy Hoang Nguyen²^{1,2} St. Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

© Бажин В. Ю., Нгуен Хю Хоанг, 2022

Abstract. This study is aimed at improving the efficiency of monitoring and automated control over the technological state of electrolytic cells during copper refining using the recognition and identification of short circuits between the electrodes. Experimental works were performed on a laboratory bench consisting of two cells connected in series to the electrical circuit. The method of detecting short circuits is based on measuring infrared radiation using a scanning thermal imager (Optris PI 400i / PI 450i) for determining areas with elevated temperatures of electrode and electrolyte surfaces. A short-circuit detection algorithm was developed and tested in MATLAB environment using the Image Processing Toolbox MATLAB functions. The proposed method for recognizing and identifying short circuits between the electrodes of an electrolytic cell is based on using a scanning digital thermal imager. This method allows a comprehensive assessment of the contact area, determination of both the start time of a short circuit and the degree of electrode heating in the short-circuit zone, as well as establishment of temperature values in all areas, including the electrolyte temperature in the entire volume of the cell. An algorithm for searching for short-circuit locations in an electrolytic cell is proposed. This algorithm involves the collection of data and its comparison for adjusting the inter-electrode distance, ensuring a stable energy mode for the entire electrolytic line, and determining the exact position of each cathode in the cell using the threshold processing of infrared images obtained by a thermal imager. It was established that timely identification of short circuit locations in the electrolytic bath (since the onset of a contact between the electrodes), as well as recording of the growth rates of a dendritic coalescence area and electrolyte temperature, ensure timely elimination of technological disturbances during the operation of electrolytic baths. Thus, the developed method of short circuit identification for comprehensive determination and recognition of the technological state of an electrolytic cell during the electrolytic refining of copper can be used to reach a stable energy mode with minimum deviations in the process temperature.

Keywords: electrolytic refining of copper, cathode copper, digital thermal imager, IR imaging, nondestructive testing, digital twin

Acknowledgements: The study was carried out using the equipment of the Research Center "Processing problems of mineral and man-made resources" of St. Petersburg Mining University under the scientific direction "Energy-saving technologies".

For citation: Bazhin V. Yu., Nguyen Huy Hoang. Identification of electrode short circuits during the electrolytic refining of copper based on heat radiation. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):532-544. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-532-544>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время не менее 90% производимой меди проходит стадию электролитического рафинирования³. Медь, полученная в результате огневого рафинирования, содержит значительное количество примесей (0,2–1,1%) и поэтому подвергается электролитическому рафинированию для получения меди высокой степени чистоты 99,999% и извлечения благородных металлов и других ценных элементов (селен, теллур и т.д.) из электродных шламовых осадков [1–6].

В работе рассматривается тип электролитических ячеек, где анод выполнен из меди после стадии огневого рафинирования [1], а катод состоит из тонких листов чистой меди. Электролитом служит водный раствор серной кислоты, температура электролита находится в интервале 55–65°C. При пропускании постоянного тока анод растворяется, а медь переходит в раствор и, очищенная от приме-

сей, осаждается на катодах. Примеси переходят в шламовый осадок и периодически удаляются в хранилище.

Во время работы электролизной ячейки возможны короткие замыкания в виде дендритных срастаний между электродами, которые приводят к резкому повышению температуры электролита, изменению его состава, разрушениям контактных участков электродов, изменению состава шламовых осадков, и, в целом, сбоям устойчивого энергообеспечения электролизной серии [6–8]. Контроль этих параметров в условиях производства проводится циклически при помощи визуального осмотра или с помощью ручных измерений. Время принятия решения для управления технологическим процессом, особенно при отклонении от установленных значений параметров, может составлять от 20 до 60 мин, что неизбежно приводит к значительным потерям электроэнергии. Актуальным пред-

³Баймаков Ю. В., Журин А. И. Электролиз в гидрометаллургии: учеб. пособ. М.: Изд-во «Металлургиздат», 1977. 336 с.

ставляется идентифицировать эти параметры и технологические нарушения при помощи специального средства измерения – цифрового тепловизора – для принятия своевременных управляющих воздействий через систему автоматизированного контроля электролизной серии.

Для проведения опытов использовали лабораторный стенд, состоящий из двух последовательно включенных в электрическую цепь ячеек. Схема имитационного стенда электролитического рафинирования показана на рис. 1. Электрический ток проходит от анодов через электролит к катодам, расположенным в левой ячейке. Между ячейками электрический ток проходит от катодов в левой ячейке к анодам в правой ячейке [7–10].

Приложенное к ячейке напряжение направляет ток от анода к катоду через электролит, транспортируя ионы меди Cu^{2+} от анода к катоду. Другие примеси в растворе электролита переходят в осадок на дно ванны. Электролиз для наращивания слоя катодной меди проходит от 10 до 30 дней вплоть до растворения анода на 80–85%. В наших исследованиях полностью готовые катоды удаляли из ванны через 7–15 дней после установки (замены). Схема процесса электролитического рафинирования меди для проведения опытов показана на рис. 2 [6].

Существует множество способов бесконтактного контроля замыканий между электродами [4–8] при помощи различных технических устройств, но в основном они связаны временной фиксацией самого нарушения. Разработанный способ идентификации при распознавании замыкания при помощи сканирующего цифрового тепловизора позволяет комплексно оценить площадь контакта, определить время начала замыкания, степень нагрева электродов в зоне короткого замыкания (КЗ), установить значения температур на всех участках, включая и температуру электролита во всем объеме ячейки.

При электролитическом рафинировании меди необходимо проводить регулярные осмотры ячейки для обнаружения КЗ между анодом и катодом. Несвоевременно обнаруженные короткие замыкания, кроме повышенного расхода электроэнергии, приводят к

изгибу контактных частей электродов с подводящей шиной, нарушению расстояния между электродами по всей длине электродов, резкому увеличению площади (наросту) дендритного срастания. При замыкании электродов ток проходит кратчайшее расстояние, и плотность тока на этих участках будет увеличиваться там, где расстояние между анодом и катодом наименьшее. Это означает, что медь будет расти быстрее в этих участках. Дендриты могут образовывать прочный мост между анодом и катодом, замыкая электроды. В случае КЗ ток выделяет тепло в короткозамкнутых электродах и в системе распределения тока вместо выработки меди. Особенно сильно нагреваются катодные стержни. Расход электроэнергии означает снижение эффективности по току. Короткие замыкания также приводят к получению медного катода, загрязненного примесями из-за отложений шлама на поверхности, и искривлению катода. КЗ должны быть устранены как можно скорее путем выпрямления погнувшихся выводов катода или разрыва погруженных медных дендритов.

На рис. 3 показана температура поверхности катодных стержней в данной ячейке. Катод пронумерован от 1 до 61 по горизонтальной оси. В нормальных условиях температура поверхности катодных стержней составляет 50–60°C, а короткозамкнутый катод имеет температуру около 90°C и более. Согласно рис. 3, в этой ячейке произошли три (катоды 9, 22, 47) серьезных КЗ, и одно приближается (катод 17).

При использовании разработанных ранее способов контроля [11–17] КЗ между анодом и катодом можно обнаружить путем измерения температуры поверхности катодов, датчиков напряжения между анодом и катодом или при изменении магнитного поля катодных стержней, создаваемого электрическим током. В этих случаях на производстве применяют ручные гауссметры или инфракрасные (ИК) сканеры, закрепленные к кран-балке внутри цеха. Такие системы в комплексе обеспечивают компьютеризированный мониторинг напряжения в ячейках по всей серии электролиза. Инфракрасные сканеры, переносимые краном, используются более двадцати лет

для проверки ванн на электролизных заводах, чтобы получить их тепловую карту, в которых можно легко обнаружить короткие замыкания. Также для проверки состояния ванны применяют ручные инфракрасные сканеры – компьютеризированный мониторинг напряжения на ванне для быстрого обнаружения КЗ, но они передают информацию только о текущем

состоянии ячейки, в которой произошло короткое замыкание. Для обнаружения короткозамкнутой анодно-катодной пары необходимо использовать другой (более совершенный) метод, когда накапливается информация о состоянии ячейки во время любого технологического отклонения.

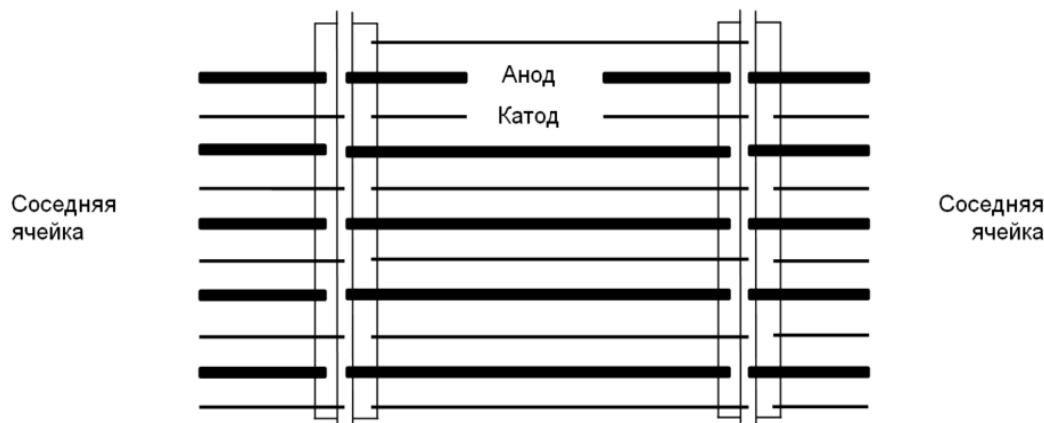


Рис. 1. Расположение электродов и схема электролитического рафинирования меди в ячейке лабораторного имитационного стенда

Fig. 1. Electrode location and a diagram of copper electrolytic refining in the cell of the laboratory test bench

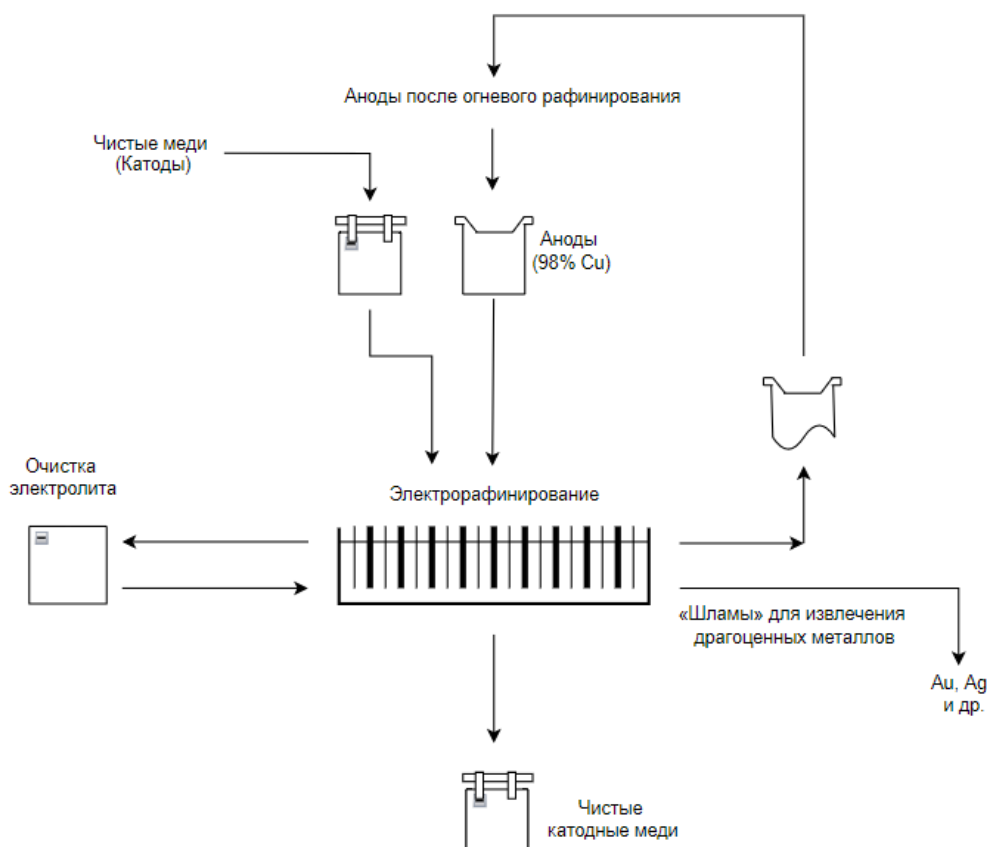


Рис. 2. Схема процесса электролитического рафинирования меди
Fig. 2. Diagram of copper electrolytic refining

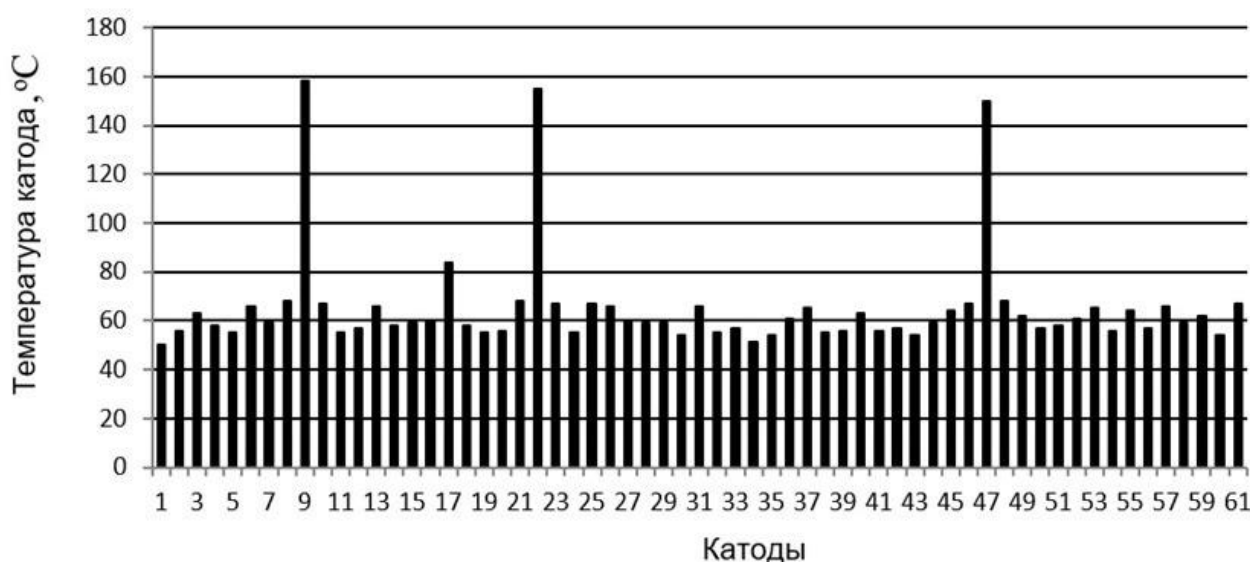


Рис. 3. Изменение температуры поверхности катодов в ячейке, зафиксированное при помощи тепловизора при сканировании

Fig. 3. Cathode surface temperature variation in a cell recorded by a thermal imager under scanning

Автоматически обнаружить короткие замыкания сложно, потому что они случайно появляются, и их размер и характеристики весьма разнообразны.

Цель исследования заключается в реализации способа идентификации технологического состояния электролитической ячейки во время КЗ при дендритном срастании между электродами при помощи сканирующего тепловизора. Предлагаемый способ основан на получении инфракрасного изображения электролизеров в режиме онлайн, получаемого тепловизором, и обработке текущих изображений. С помощью инфракрасного контроля можно снизить время обработки информации и принятия управляющего воздействия при регистрации технологического нарушения после обработки ИК-изображения, когда можно получить точные данные по времени образования, площади и местоположению короткозамкнутых катодов. Эксперименты, проведенные в ходе этого исследования, описаны в разделе 2 с использованием некоторых примеров изображений. В разделе 3 представлен разработанный алгоритм идентификации коротких замыканий по тепловому изображению. Результаты обсуждаются в разделе 4.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В эксперименте использовали тепловизоры (инфракрасные камеры) Optris и PI 400i/PI 450i, которые являются самыми компактными тепловизорами в своем классе. Обладая частотой измерения 80 Гц и оптическим разрешением 382x288 пикселей, устройства создают тепловые диаграммы в режиме реального времени с максимальной скоростью⁴.

Инфракрасная камера PI 450i при температурной чувствительности 40 мК наиболее подходит для определения минимальных перепадов температуры, что является неотъемлемой частью мероприятий по контролю качества продукции при обслуживании точной техники. Компактные и мощные ИК-камеры работают в диапазоне температуры от -20°C до 900°C, причем для модели Optris PI 400i выборочно диапазон может быть расширен от -20°C до 1500°C. В рамках выполнения работы было специально создано программное обеспечение для более обширного документирования и анализа тепловых диаграмм. Оно позволяет проводить термографический анализ в режиме реального времени и дистанционно управлять тепловизором, а также задействовать режим однострочной камеры. Получаемые тепловизион-

ные изображения использовались в качестве исходного материала при разработке и тестировании алгоритма обнаружения короткого замыкания на имитационной электролитической ячейке. Алгоритм был создан и протестирован с помощью программного обеспечения MATLAB при использовании функций Image Processing Toolbox MATLAB⁵.

Состояние электролитических ячеек было отсканировано с помощью ИК-камеры, установленной на мостовом кране. Инфракрасная камера размещалась примерно в 5,5 м от поверхности электродов. Результаты испытаний показаны на рис. 4. На этом тепловом изображении можно обнаружить одну точку короткого замыкания в виде цветных областей. На рис. 4 показано одно из преимуществ электролизеров с ИК-визуализацией, когда одновременно можно измерять несколько электролитических ячеек.

В качестве последнего шага ИК-камера была установлена на кране, и объектив камеры был направлен вниз на ячейки. Расстояние между объективом камеры и поверхностью ванн (ячеек) составляло 4,6 м. В ИК-камере использовался широкоугольный об-

ектив, поэтому вся ячейка помещалась в область изображения. На примерах изображений можно увидеть 61/61 катод. Цель этого эксперимента состояла в том, чтобы собрать материал для разработки алгоритма обнаружения и убедиться, что ИК-камера может быть размещена на кране. Мы протестировали использование кранов с камерами с разной скоростью, чтобы определить наиболее оптимальную скорость перемещения для последующего использования на заводе, необходимую для проверки всех ванн на серии. Один из результатов этих испытаний показан на рис. 5.

На рис. 5 показаны две ячейки. Они разделены линией распределения тока. Слева расположены сливные отверстия для электролита и осадка. В переливных стоках находится электролит (цветные участки), который имеет более высокую температуру по сравнению с температурой окружающей среды электролита и катодных пластин. По этой причине они видны на изображении. Катоды в нормальном состоянии можно обнаружить в виде черных линий. Видно, что присутствует одно короткое замыкание в середине нижней ячейки в виде красно-белых областей.

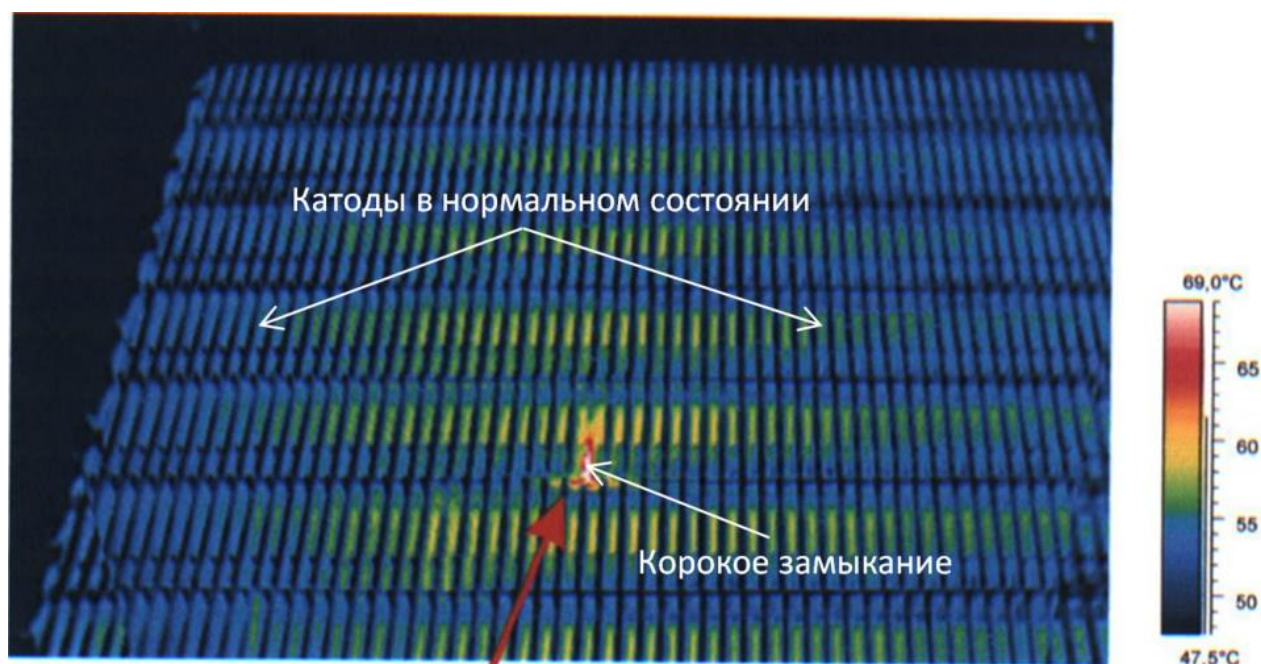


Рис. 4. Короткое замыкание (красно-белые области) в секции ячеек
Fig. 4. Short circuit (red and white areas) in the cell section

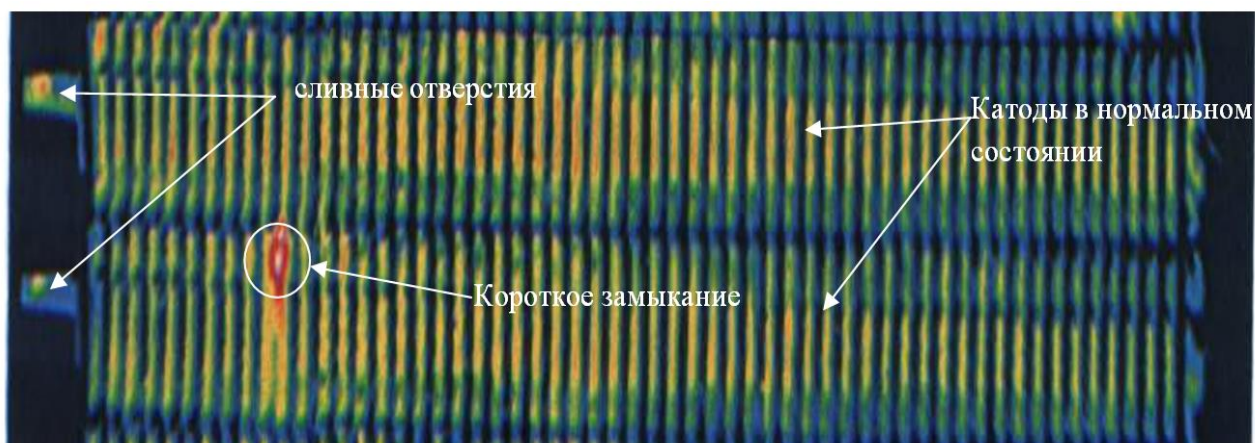


Рис. 5. Изображение ячейки, сканированное с мостового крана
Fig. 5. Cell image scanned from an overhead traveling crane

Изображения ячеек, выполненные тепловизором, наглядно показывают состояние ячеек и могут быть использованы для обнаружения короткого замыкания и общего состояния ячейки. Интерпретацию изображений можно выполнять и обрабатывать вручную или с помощью компьютера после сбора информации в базе данных (БД). В этом случае можно говорить о создании в автоматизированной системе управления технологическим процессом (АСУ ТП) цифрового двойника [18–24]. В разделе 3 представлен метод автоматизированной идентификации и интерпретации изображений с использованием обработки сканированных изображений.

АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Чтобы автоматизировать процесс обнаружения и фиксации короткого замыкания с помощью тепловизора, изображение ячейки для проверки должно быть отмечено в момент реального времени, причем с самого начала его образования при дендритном срастании. Алгоритм обнаружения и идентификации по информационным признакам требует, чтобы ИК-изображение ячейки было зафиксировано при наведении камеры на объект и его контуры выше текущего распределителя (промежуточной шины), когда шина

находится между двумя ячейками. Причина такого захвата изображения, при котором отображаются две ячейки, состоит в том, что это облегчает поиск для создания адекватного алгоритма и сбор информации о состоянии ячейки гораздо легче идентифицировать по признакам (перегрев катода, повышение температуры электролита, площадь теплового контура при замыкании и т.д.). Ячейка должна быть расположена в поле общего изображения, прежде чем будут обнаружены места короткозамкнутых катодов для фиксирования времени начала и скорости роста площади, температуры электролита. Рис. 6 иллюстрирует пример необходимого времени для захвата изображения в режиме реального времени.

Алгоритм обнаружения включает в себя следующие три основных стадии:

1. Поиск исходных точек и линий для электролитической ячейки (от центральной оси до промежуточной переходной шины).
2. Месторасположение и нумерация катодов на общей матрице ячейки.
3. Поиск короткозамкнутых электродов с использованием порогов для последующей идентификации и причин образования замкнутых участков по результатам обработки данных изображения.

⁴Ульрих К. Инфракрасные термометры и инфракрасных камер // Optris RU. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.optris.ru/infkrasnaja-kamera-optris-pi-640> (17.01.2022).

⁵Image Processing Toolbox // MathWorks. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/images/> (17.01.2022).

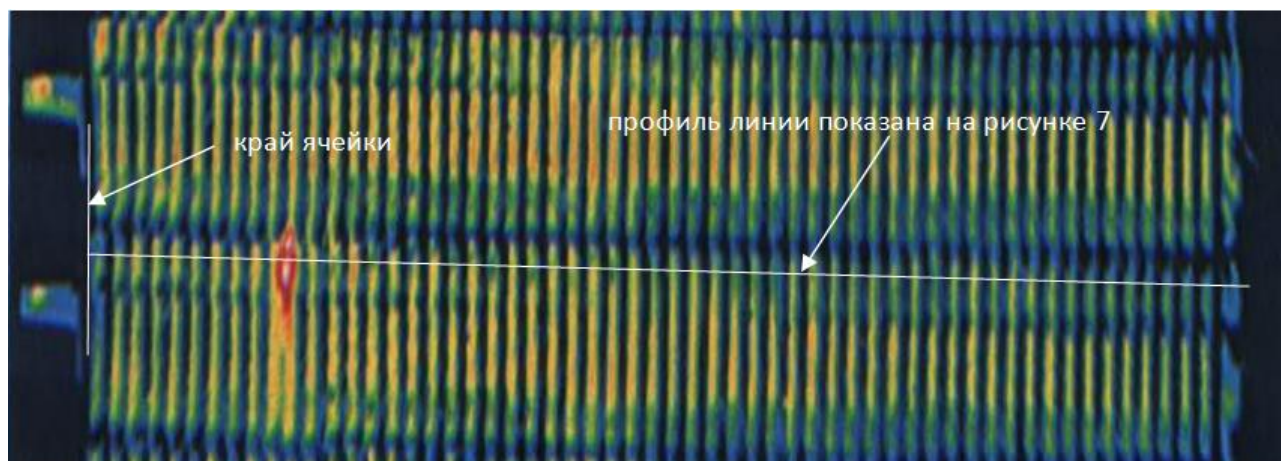


Рис. 6. Изображение ячейки, захваченное в режиме реального времени
Fig. 6. Cell image captured in the real-time mode

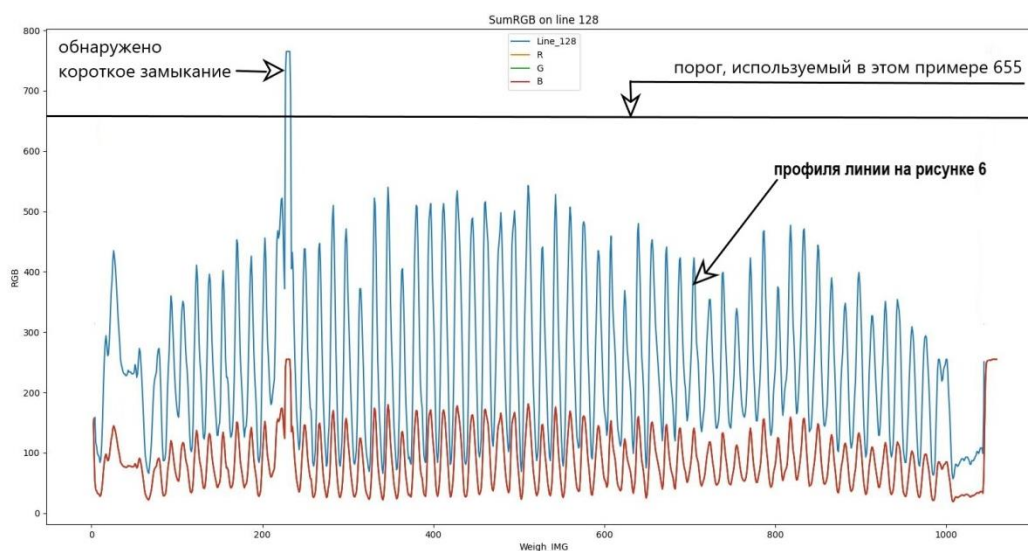


Рис. 7. Значения шкалы излучения и изменения цвета для профиля линии 6 во времени
Fig. 7. Values of the color emission and change scale for the line 6 profile in time

Прежде чем будут обнаружены какая-либо точка и площадь короткого замыкания, необходимо определить положение ячейки на изображении [25, 26]. Алгоритм использует геометрию ячейки для определения осевой линии ячейки. После того, как центральная линия ячейки будет позиционирована, текущая полоса распределения может быть обозначена далее с использованием верхней и нижней осевых линий ячейки. После фиксации текущего распределительного стержня определяется, что ячейка на тепловом изображении имеет вертикальную ориентацию. Чтобы расположить ячейку в горизонтальной ориентации, алгоритм пытается найти край

ячейки для последующей идентификации. После того как ячейка найдена на изображении, определяется положение катодов. При этом катоды нумеруются, начиная с конца ячейки, где расположен слив для перелива электролита. Поиск короткозамкнутых катодов осуществляется с помощью последовательных стадий. Примеры значений шкалы света для линии, отмеченной красно-белым цветом, показаны на рис. 6 и 7.

Алгоритм обнаружения КЗ был протестирован с различными типами тепловизионных изображений ячеек (ИК-характеристик) на имитационном лабораторном стенде с последующей адаптацией в реальных условиях

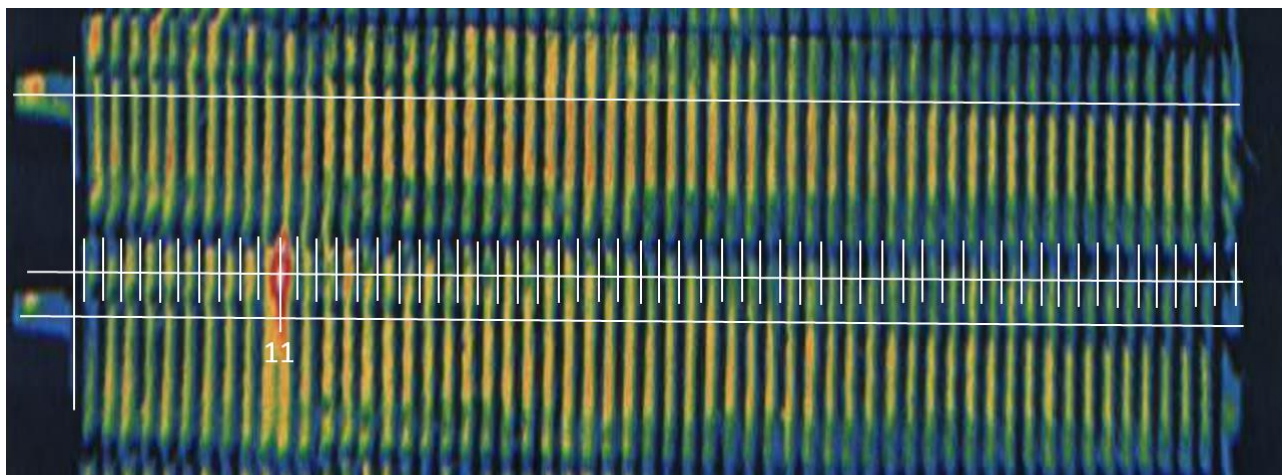


Рис. 8. Проверка ячейки с использованием алгоритма обнаружения и идентификации короткого замыкания
Fig. 8. Cell testing using short circuit identification algorithm

электролитического производства катодной меди. На рис. 8 показан результат, где светлыми линиями обозначаются целевые значения информационного потока, обнаруженные алгоритмом идентификации. В данном случае короткозамкнутые катодные участки имеют номера 11.

На многих электролизных установках элементы, как правило, покрыты пластиковым покрытием для удержания тепла, что затрудняет использование ИК-изображения для осмотра элементов. Обычно в этом случае расположение ячейки может быть выполнено успешно, но для поиска и нумерации короткозамкнутых катодов необходимо использовать расположение катодов по умолчанию. Пример изображения участка с нанесенным покрытием доказывает, что алгоритм обнаружения и идентификации успешно определил местоположение клетки и ее характеристики. В зоне перегрева температура поверхности электрода составила 160°C , а электролит в зоне максимального нагрева достиг температуры 92°C . Площадь замыкания составила $14\text{--}18\text{ см}^2$ (2,2% от всей контролируемой поверхности, которая увеличивалась со скоростью $2,4\text{ см}^2/\text{мин}$). Полученные данные переносятся в БД на третий уровень системы АСУ ТП для принятия решения о мгновенном разрушении срастания между электродами [27–30]. В данном случае в комплексе с тепловизором созданный объект контроля и идентификации состояния электролизной ячейки работает как цифровой

двойник, включая функции прогноза будущей технологической ситуации по полученным ранее данным.

В итоге через сканирующие тепловизоры этой системы можно обнаружить любые короткозамкнутые катоды и зафиксировать начало отклонения и скорость роста площади, а в нормальном состоянии – нет. Расположение катодов по умолчанию используется для определения количества короткозамкнутых катодов, и дает адекватный результат и для приведенных данных по измерению температуры электролита и площади самого замыкания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная система контроля позволяет определить участки коротких замыканий между электродами и при помощи сканирующего цифрового тепловизора идентифицировать по признакам отклонение технологических параметров электролитической ячейки. Разработанная имитационная установка в виде цифрового двойника является более оптимальным методом прогнозирования и контроля коротких замыканий, использование которой эффективнее, чем применение ручных методов с термокраской в настоящее время.

В рамках проведения испытаний получены изменения параметров (роста площади и объема короткого замыкания между электродами), данные скорости роста температуры поверхности электрода и температуры электролита, ИК-характеристики на различных

стадиях процесса после замыкания электродов для идентификации параметров.

Полученные на лабораторном стенде результаты позволяют получить зависимости для обеспечения последующего управляю-

щего воздействия в рамках автоматизированной системы управления электролизной серии и устойчивого энергетического режима при минимизации удельного расхода электрической энергии на 1 т катодной меди.

Список источников

1. Булатов К. В., Жуков В. П. Технологические возможности металлургической переработки промпродуктов обогащения полиметаллических руд и обеднения шлаков медеплавильного производства в агрегате «Победа» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 421–433. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433>.
2. Davenport W. G., King M., Schlesinger M., Biswas A. K. Extractive metallurgy of copper. London: Oxford, Pergamon, 2002. 452 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elsevier.com/books/extractive-metallurgy-of-copper/davenport/978-0-08-044029-3> (12.01.2022).
3. Антонов М. А. Метод порошковой металлургии для спекания изделий из медных порошков // Металлообработка. 2001. № 5. С. 48–49.
4. Selivanov E. N., Popov A. I., Selmenskikh N. I., Lebed A. B. Oxide inclusions in copper during its fire refining // Non-ferrous Metals. 2013. No. 2. P. 19–22.
5. Вольхин А. И., Елисеев Е. И., Жуков В. П., Смирнов Б. Н. Анодная и катодная медь: физико-химические и технологические основы. Челябинск: Южно-Уральское книжное изд-во, 2001. 431 с.
6. Левин А. И., Номберг Н. И. Электролитическое рафинирование меди. М.: Изд-во «Металлургияиздат», 1963. 213 с.
7. Скрида О. И., Ладин Н. А., Дылько Г. Н. Определение оптимального состава электролита для электролитического рафинирования меди // Записки Горного института. 2005. Т. 165. С. 170–182.
8. Бажин В. Ю., Горленков Д. В., Нгуен Х., Никитина Л. Н. Реализация опыта цифровых автоматизированных систем управления электролитического рафинирования меди на предприятиях Вьетнама // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. P. 611–622. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-611-622>.
9. Пат. № 2455374, Российская Федерация, С25С 1/12. Способ получения высококачественной меди / В. Т. Дмитриев, Г. А. Боярских, С. В. Дмитриев, Э. В. Горшков. Заявл. 10.04.2008; опубл. 10.07.2012. Бюл. № 19.
10. Пат. № 2597445, Российская Федерация, С22В 15/00, С22В 7/00. Способ получения нанопорошка меди из отходов / Е. В. Агеев, Н. М. Хорьякова, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеева, В. С. Малюхов; Заявл. 02.09.2014; опубл. 10.09.2016. Бюл. № 25.
11. Zeng Qingyu, Li Chun, Meng Yi, Tie Jun, Zhao Rentao, Zhang Zhifang. Analysis of interelectrode short-circuit current in industrial copper electrorefining cells // Measurement. 2020. Vol. 164. P. 108015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108015>.
12. Гронь Д. Н., Горенский Б. М. Информационно-управляющая система процессом электролитического рафинирования меди // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2009. Т. 2. № 3. С. 301–310.
13. Гронь Д. Н., Гронь Е. А., Кирыкова О. В., Лапина Л. А., Жаринова Н. Ю. О применении системы поддержки принятия решений в гидрометаллургии меди // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-2. С. 129–134. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=22721> (12.01.2022).
14. Rudko V. A., Derkunsii I. O., Gabdulkhakov R. R., Konoplin R. R., Pyagay I. N. Kinetics of various hydrocarbon groups formation in distillates obtained during the production of needle coke via the delayed coking of decantoil // Egyptian Journal of Petroleum. 2022. Vol. 31. Iss. 1. P. 33–38. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2022.02.002>.
15. Pyagay I. N., Shaidulina A. A., Konoplin R. R., Artyushevskiy D. I., Gorshneva E. A., Sutyaginsky M. Production of amorphous silicon dioxide derived from aluminum fluoride industrial waste and consideration of the possibility of its use as Al₂O₃-SiO₂ catalyst supports // Catalysts. 2022. Vol. 12. Iss. 2. <https://doi.org/10.3390/catal12020162>.
16. Li Xin, Li Yonggang, Zhu Hongqiu, Wu Renchao, Zhou Can. Short circuit fault detection against high thermal background using a two-level scheme based on dog filter // Solving Engineering and Science Problems Using Complex Bio-inspired Computation Approaches. 2021. Vol. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8824768>.
17. Jia R. M., Ma X. L., He W. Q. Infrared short-circuit detection for electrolytic copper refining // International Conference on Advanced Electronic Science and Technology. 2016. P. 844. <https://doi.org/10.2991/aest-16.2016.113>.
18. Кадыров Э. Д. Комплексная автоматизированная система управления пирометаллургическим производством меди // Записки Горного Института. 2011. Т. 192. С. 120–124.
19. Xie Fengchun, Li Haiying, Ma Yang, Li Chuncheng, Cai Tingting, Huang Zhiyuan, et al. The ultrasonically assisted metals recovery treatment of printed circuit board waste sludge by leaching separation // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 170. Iss. 1. P. 430–435. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.077>.
20. Sun Rui, Qin Gang, Li Gaibian, Hu Jinbao, Xiong Jingqi, Xu Huanwei. Abnormal conductive state identification of the copper rod in a nickel electrolysis procedure based on infrared image features and position characteris-

tics // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Iss. 7. P. 3691. <https://doi.org/10.3390/app12073691>.

21. Родниченко Е. К., Трифонова М. Е., Данилова А. А. Методы определения короткого замыкания при электролитическом рафинировании меди // World Science: Problems and Innovations: сб. ст. XLIX Междунар. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 25 декабря 2020 г.). Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2020. С. 90–94.

22. Litvinenko V. Advancement of geomechanics and geodynamics at the mineral ore mining and underground space development // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. Vol. 1. London: CRC Press, 2018. P. 3–16. <https://doi.org/10.1201/9780429461774>.

23. Litvinenko V. S., Leitchenkov G. L., Vasiliev N. I. Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling // Geochemistry. 2020. Vol. 80. Iss. 3. P. 125556. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125556>.

24. Goc K., Prendota W., Chlubny L., Strączek T., Tokarz W., Borowiak (Chachlowska) P., et al. Structure, morphology and electrical transport properties of the Ti3AlC2 materials // Ceramics International. 2018. Vol. 44. Iss. 15. P. 18322–18328. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.045>.

25. Стреляев С. И. Фомичева О. А. Методы распознавания ИК-изображения // Известия Тульского государ-

ственного университета. Технические науки. 2018. № 11. С. 207–212.

26. Берг И. А., Поршнева С. В. Исследование методов анализа ИК-тепловизионных изображений горящего факела // Научная визуализация. 2020. Vol. 12. No. 2. P. 37–52. <https://doi.org/10.26583/sv.12.2.04>.

27. Correa P., Cipriano A., Nuñez F., Salas J. C., Lobel H. Forecasting copper electrorefining cathode rejection by means of recurrent neural networks with attention mechanism // IEEE Access. 2021. No. 9. P. 79080–79088. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074780>.

28. Салтыкова С. Н., Доливо-Добровольская Г. И., Максимова А. В. Анализ данных по кристаллохимической природе фаз медно-никелевого фанштейна и бинарной системе Co–S // Записки Горного института. 2013. Т. 202. С. 209.

29. Соэ К. М., Руан Р., Цзя Я., Тан Ц., Ван Ч., Ши Ц. [и др.]. Влияние осаждения ярозита на баланс железа при кучном биологическом выщелачивании на медном руднике Монива // Записки Горного института. 2021. Т. 247. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.11>.

30. Bazhin V. Yu., Nguyen H. H. Vietnamese metallurgy on the way out of the crisis with the use of automated control systems // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2467. P. 030018. <https://doi.org/10.1063/5.0092750>.

References

1. Bulatov K. V., Zhukov V. P. Technological capabilities for metallurgical processing of industrial products in polymetallic ore preparation and copper smelting slag depletion in the Pobeda smelting unit. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(2):421-433. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433>.

2. Davenport W. G., King M., Schlesinger M., Biswas A. K. *Extractive metallurgy of copper*. London: Oxford, Pergamon; 2002, 452 p. Available from: <https://www.elsevier.com/books/extractive-metallurgy-of-copper/davenport/978-0-08-044029-3> [Accessed 12th January 2022].

3. Antonov M. A. Method of powder metallurgy for sintering products from copper powders. *Metalloobrabotka*. 2001;5:48-49. (In Russ.).

4. Selivanov E. N., Popov A. I., Selmenskikh N. I., Lebed A. B. Oxide inclusions in copper during its fire refining. *Non-ferrous Metals*. 2013;2:19-22.

5. Vol'hin A. I., Eliseev E. I., Zhukov V. P., Smirnov B. N. *Anode and cathode copper: physicochemical and technological fundamentals*. Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skoe knizhnoe izdatel'stvo; 2001, 431 p. (In Russ.).

6. Levin A. I., Nomberg N. I. *Electrolytic refining of copper*. Moscow: Metallurgizdat; 1963, 213 p. (In Russ.).

7. Skirda O. I., Ladin N. A., Dyl'ko G. N. Determining electrolyte optimal composition for electrolytic refining of copper. *Zapiski Gornogo instituta*. 2005;165:170-171. (In Russ.).

8. Bazhin V. Yu., Gorlenkov D. V., Nguyen H., Nikitina L. N. Implementation of digital automated control systems

at electrolytic copper refining plants in Vietnam. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):611-622. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-611-622>.

9. Dmitriev V. T., Boyarskih G. A., Dmitriev S. V., Gorshkov E. V. *Production method of high-quality copper*. Patent RF, no. 2455374; 2012.

10. Ageev E. V., Hor'yakova N. M., Gvozdev A. E., Ageeva E. V., Malyuhov V. S. Production method of copper nanopowder from waste. Patent RF, no. 2597445; 2016.

11. Zeng Qingyu, Li Chun, Meng Yi, Tie Jun, Zhao Rentao, Zhang Zhifang. Analysis of interelectrode short-circuit current in industrial copper electrorefining cells. *Measurement*. 2020;164:108015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108015>.

12. Gron D. N., Gorensky B. M. Information-operating system process of electrolytic refinement of copper. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologiya = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2009;2(3):301-310. (In Russ.).

13. Gron' D. N., Gron' E. A., Kiryakova O. V., Lapina L. A., Zharinova N. Yu. About application of system decision support in hydrometallurgy copper. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015;2-2:129-134. Available from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=22721> [Accessed 12th January 2022].

14. Rudko V. A., Derkunsii I. O., Gabdulkhakov R. R., Konoplin R. R., Pyagay I. N. Kinetics of various hydrocarbon groups formation in distillates obtained during the production of needle coke via the delayed coking of de-

cantoil. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2022;31(1):33-38. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2022.02.002>.

15. Pyagay I. N., Shaidulina A. A., Konoplin R. R., Artyushevskiy D. I., Gorshneva E. A., Sutyaginsky M. Production of amorphous silicon dioxide derived from aluminum fluoride industrial waste and consideration of the possibility of its use as Al₂O₃-SiO₂ catalyst supports. *Catalysts*. 2022;12:2. <https://doi.org/10.3390/catal12020162>.

16. Li Xin, Li Yonggang, Zhu Hongqiu, Wu Renchao, Zhou Can. Short circuit fault detection against high thermal background using a two-level scheme based on dog filter. *Solving Engineering and Science Problems using Complex Bio-inspired Computation Approaches*. 2021;2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8824768>.

17. Jia R. M., Ma X. L., He W. Q. Infrared short-circuit detection for electrolytic copper refining. In: *International Conference on Advanced Electronic Science and Technology*. 2016;844. <https://doi.org/10.2991/aest-16.2016.113>.

18. Kadyrov E. D. Integrated automated process control system of pyrometallurgical copper production. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2011;192:120-124. (In Russ.).

19. Xie Fengchun, Li Haiying, Ma Yang, Li Chuncheng, Cai Tingting, Huang Zhiyuan, et al. The ultrasonically assisted metals recovery treatment of printed circuit board waste sludge by leaching separation. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;170(1):430-435. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.077>.

20. Sun Rui, Qin Gang, Li Gaibian, Hu Jinbao, Xiong Jingqi, Xu Huanwei. Abnormal conductive state identification of the copper rod in a nickel electrolysis procedure based on infrared image features and position characteristics. *Applied Sciences*. 2022;12(7):3691. <https://doi.org/10.3390/app12073691>.

21. Rodnichenko E. K., Trifonova M. E., Danilova A. A. Methods for determining short circuit under electrolytic copper refining. In: *World Science: Problems and Innovations: sbornik statej XLIX Mezhdu-narodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = World Science: Problems and Innovations: Collected articles of the 49th International scientific and practical conference*. 25 December 2020, Penza. Penza: Nauka i Prosvesh-

chenie; 2020, p. 90-94. (In Russ.).

22. Litvinenko V. Advancement of geomechanics and geodynamics at the mineral ore mining and underground space development. In: *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*. Vol. 1. London: CRC Press; 2018, p. 3-16. <https://doi.org/10.1201/9780429461774>.

23. Litvinenko V. S., Leitchenkov G. L., Vasiliev N. I. Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling. *Geochemistry*. 2020;80(3):125556. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125556>.

24. Goc K., Prendota W., Chlubny L., Strączek T., Tokarz W., Borowiak (Chachlowska) P., et al. Structure, morphology and electrical transport properties of the Ti3AlC2 materials. *Ceramics International*. 2018;44(15):18322-18328. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.045>.

25. Strel'yaev S. I. Fomicheva O. A. IR picture recognition methods. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. = Proceedings of the Tula State University*. 2018;11:207-212. (In Russ.).

26. Berg I. A., Porshnev S. V. *Studying analysis methods of the burning torch infrared thermal images. Nauchnaya vizualizatsiya = Scientific Visualization*. 2020;12(2):37-52. <https://doi.org/10.26583/sv.12.2.04>.

27. Correa P., Cipriano A., Nuñez F., Salas J. C., Lobel H. Forecasting copper electrorefining cathode rejection by means of recurrent neural networks with attention mechanism. *IEEE Access*. 2021;9:79080-79088. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074780>.

28. Dolivo-Dobrovolskaya G. I., Saltikova S. N., Maksimova A. V. Analysis of data on crystallochemical nature of the phases of the copper-nickel matte and a binary system Co-S. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2013;202:209. (In Russ.).

29. Soe K. M., Ruan R., Jia Y., Tan Q., Wang Z., Shi J., et al. Influence of jarosite precipitation on iron balance in heap bioleaching at Monywa copper mine. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2021;247. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.11>

30. Bazhin V. Yu., Nguyen H. H. Vietnamese metallurgy on the way out of the crisis with the use of automated control systems. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2467:030018. <https://doi.org/10.1063/5.0092750>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бажин Владимир Юрьевич,

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автоматизации
технологических процессов и производств,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург,
21-я линия В.О., 2, Россия

Нгуен Хю Хоанг,

аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург,
21-я линия В.О., 2, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir Yu. Bazhin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of
Automation of Technological Processes and Production,
Saint Petersburg Mining University,
2, 21 Line, Vasilievsky Island, Saint Petersburg 199106,
Russia

Huy Hoang Nguyen,

Postgraduate student,
Saint Petersburg Mining University,
2, 21 Line, Vasilievsky Island, Saint Petersburg 199106,
Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 08.05.2022; одобрена после рецензирования 09.06.2022; принята к публикации 20.09.2022.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 08.05.2022; approved after reviewing 09.06.2022; accepted for publication 20.09.2022.



Научная статья

УДК 669.053.4

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-545-553>

Исследования по экстракции меди реагентом Acorga M5774 из растворов кучного выщелачивания месторождения Саяк

Люция Монировна Каримова^{1✉}, Айдар Аргын²¹ТОО «КазГидроМедь», г. Караганда, Республика Казахстан²Satbayev University, г. Алма-Ата, Республика Казахстан¹lutsia.08@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6205-6585>²aidar.argyn@solvay.com, <https://orcid.org/0000-0001-5001-4687>

Резюме. Цель – проведение исследований по экстракции/реэкстракции меди с применением высокоэффективного экстрагента Acorga M5774 из растворов кучного выщелачивания. Объектом исследований явился экстрагент компании «Solvay» – Acorga M5774 (производитель «Sytec», Бельгия/США), представляющий собой модифицированный альдоксим (5-нонилсалицилальдоксим). Данный экстрагент имеет большую селективность в отношении меди к железу и способствует более быстрому разделению фаз. Для испытаний использовали продуктивный раствор, полученный после перколяционного выщелачивания руды месторождения Саяк (Республика Казахстан), г/дм³: H₂SO₄ – 11,67; Cu – 2,44; Fe – 2,613; Al – 0,345; Si – 0,127; Zn – 0,05, с pH = 1,85. Изучение показателей и работоспособности экстрагента проводилось путем построения кривых изотерм экстракции и реэкстракции, а также моделирования схемы цепи переделов в закрытом цикле и определением извлечения меди на переделе жидкостной экстракции. Проведены исследования по экстракции/реэкстракции меди из продуктивного раствора. В качестве разбавителя экстрагента использовали Elixore 205 – алифатический продукт компании «Total» (Франция), количество которого в органической фазе составляло 90%. На основании проведенных исследований построены изотермы экстракции и реэкстракции. Смоделирован процесс жидкостной экстракции с использованием данных изотерм, при этом извлечение меди составило 96,18% (при соотношении органическая фаза/водная фаза – 1,1), а насыщение на реагент – 79%. Получена зависимость переноса железа из органической фазы от насыщения органической фазы медью. Таким образом, проведенные исследования подтвердили эффективность использования экстрагента Acorga M5774 для извлечения меди из продуктивных растворов кучного выщелачивания руды месторождения Саяк.

Ключевые слова: раствор, медь, экстракция, экстрагент Acorga M5774, диаграмма

Для цитирования: Каримова Л. М., Аргын А. Исследования по экстракции меди реагентом Acorga M5774 из растворов кучного выщелачивания месторождения Саяк // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 545–553. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-545-553>.

METALLURGY

Original article

Studies into copper extraction by Acorga M5774 from heap leaching solutions of the Sayak deposit

Lyutsiya M. Karimova^{1✉}, Aidar Argyn²¹KazHydroMed LLP, Karaganda, Kazakhstan²Satbayev University, Almaty, Kazakhstan¹lutsia.08@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6205-6585>²aidar.argyn@solvay.com, <https://orcid.org/0000-0001-5001-4687>

Abstract. The process of extraction/re-extraction of copper from heap leaching solutions using the Acorga M5774 Solvay extractant (Sytec, Belgium/USA) representing a modified aldoxime (5-nonylsalicylaldoxime) was studied. This extractant is characterized by a high effectiveness and a large selectivity of copper to iron, thus enabling a more rapid

phase separation. During experiments, a pregnant leach solution obtained after the percolation leaching of the Sayak deposit ore (Republic of Kazakhstan) was used, g/dm^3 : H_2SO_4 – 11.67, Cu – 2.44, Fe – 2.613, Al – 0.345, Si – 0.127, Zn – 0.05, pH = 1.85. The main parameters and effectiveness of the extractant were studied by plotting extraction and re-extraction isotherms, as well as by simulating the closed cycle processing sequence and determining the level of copper extraction at the liquid extraction stage. The extraction/re-extraction of copper from pregnant leach solutions was studied. An aliphatic product of Elixore 205 (Total, France) was used as an extractant diluent, with the amount in the organic phase equal to 90%. Based on the conducted studies, extraction and re-extraction isotherms were plotted. In the liquid extraction process, simulated using the obtained isotherms, the extraction of copper comprised 96.18% (at an organic/aqueous phase ratio of 1.1) with a reagent saturation of 79%. The dependence of iron transfer from the organic phase on the saturation of organic phase with copper was obtained. Thus, the performed studies confirmed the effectiveness of the Acorga M5774 extractant for the purposes of extracting copper from pregnant leach solutions obtained during heap leaching of the Sayak deposit ore.

Keywords: solution, copper, extraction, Acorga M5774 extractant, diagram

For citation: Karimova L. M., Argyn A. Studies into copper extraction by Acorga M5774 from heap leaching solutions of the Sayak deposit. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):545-553. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-545-553>.

ВВЕДЕНИЕ

Жидкостная экстракция занимает значительное место в процессах селективного извлечения, разделения и концентрирования металлов, а также в химической, радиохимической, нефтехимической и других отраслях промышленности. Преимущество экстракции заключается прежде всего в организации непрерывного высокопроизводительного процесса, а, следовательно, в уменьшении капитальных и эксплуатационных затрат.

Технологию жидкостной экстракции и электролиз применяют в основном для переработки окисленных медных руд при использовании методов кучного выщелачивания^{3,4} [1–3]. Помимо перехода в раствор меди, при этом протекает растворение многих примесей, входящих в состав руд, а именно: кремния, алюминия, магния, марганца, железа и т.д.

Эффективность процесса экстракции во многом оценивается составом и смесью органического экстракционного реагента^{5,6} [4–10]. Основные классы реагентов для экстракции меди – это альдоксимные и кетоксимные реагенты. Реагенты кетоксима были

изобретены с использованием рецептур оксима 2-гидроксibenзофенома. Позднее кетоксимные реагенты были приготовлены с использованием 2-гидрокси-5-нонилацетофенона, что сделало их более эффективными для разбавленных кислотных растворов с низким содержанием меди. Альдоксимные реагенты были изобретены компанией «Acorga Limited» с использованием 5-нонилсалицилальдоксима и затем модифицированы алкилфенолом, который позволил коммерциализировать альдоксимные реагенты. Реагенты, модифицированные сложным эфиром, имеют большую селективность в отношении меди к железу, а также способствуют более быстрому разделению фаз [11–17].

В связи с этим проведены исследования по экстракции/реэкстракции меди с применением нового высокоэффективного экстрагента Acorga M5774, обладающего высокими технологическими свойствами. В качестве разбавителя экстрагента использовали алифатический продукт Elixore 205 компании «Total»⁷ [18–21].

³Набойченко С. С., Агеев Н. Г., Карелов С. В., Мамяченков С. В., Сергеев В. А. Процессы и аппараты цветной металлургии: учеб. пособ. / под ред. С. С. Набойченко. Екатеринбург: Изд-во УГТУ – УПИ, 2013. 564 с.

⁴Марченко Н. В., Вершинина Е. П., Гильдебрандт Э. М. Металлургия тяжелых цветных металлов: электрон. учеб. пособие. Красноярск: Изд-во ИПК СФУ, 2009. 394 с.

⁵Вольдман Г. М., Зеликман А. Н. Теория гидрометаллургических процессов: учеб. пособ. М.: ООО «Интернет Инжиниринг», 2003. 464 с.

⁶Основы гидрометаллургических процессов: учеб. пособ. / под ред. В. А. Луганова. Алматы: Изд-во КазНТУ, 2005. 219 с.

⁷Основы аналитической химии. Кн. 1. Общие вопросы. Методы разделения / под ред. Ю. А. Золотова. 3-е изд., перераб. и доп.: учебник. М.: Изд-во «Высшая школа», 2004. 361 с.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для испытаний применяли продуктивный раствор, полученный после перколяционного выщелачивания руды месторождения Саяк, г/дм³: H₂SO₄ – 11,67; Cu – 2,44; Fe – 2,613; Al – 0,345; Si – 0,127; Zn – 0,05, с pH = 1,85.

Технические данные экстрагента Acorga M5774, используемого для извлечения меди путем жидкостной экстракции, представлены в табл. 1.

Продуктивный раствор PLS (от англ. Pregnant Leach Solution) отбирали из общего потока после выщелачивания руды. Органическую фазу готовили в соотношении ~10% экстракционного агента Acorga M5774 и 90% разбавителя.

Разбавитель Elixore 205 является аналогичным по назначению, близким по физико-

химическим и эксплуатационным свойствам Shellsol D70, состоит из углеводородов C11–C14 (парафины/н-алканы, цикланы/нафтены) (табл. 2).

Изучение показателей и работоспособности экстрагента проводилось путем построения кривых изотерм экстракции и реэкстракции. Далее, основываясь на полученных данных, проводилось моделирование технологической схемы экстракции-реэкстракции в закрытом цикле и определялось извлечение меди на переделе жидкостной экстракции.

Восемь точек, как правило, требуется для получения качественной кривой изотермы экстракции. Данные для определения точек берутся из анализов тщательно смешанных различных объемов исходного раствора и органической фазы в делительных воронках (время тщательного смешивания – 3–5 мин).

Таблица 1. Технические характеристики экстрагента Acorga M5774

Table 1. Specifications of the Acorga M5774 extractant

Емкость по меди, г/дм ³ на об. %	0,56–0,59
Кинетика экстракции при температуре 25°C:	
– за 15 с	не менее чем на 90%
– за 30 с	не менее чем на 95%
Кинетика реэкстракции при температуре 25°C:	
– за 15 с	не менее чем на 95%
Экстракция при 25°C, г/дм ³ по меди:	
– органическая фаза	не менее 4,2
– водная фаза	не более 1,6
Реэкстракция при 25°C, г/дм ³ по меди:	
– органическая фаза	не более 2,1
– водная фаза	не менее 32,0
Селективность, медь/железо	не менее 2000
Расслоение фаз, с:	
– экстракция	не более 60%
– реэкстракция	не более 60%
Кристаллизация/растворимость при 0°C:	
– после 24 ч	осадка не наблюдалось

Таблица 2. Основные характеристики разбавителя Elixore 205 и Shellsol D70

Table 2. Main specifications of the thinning agent Elixore 205 and Shellsol D70

Характеристика	Ед. изм.	Метод	Elixore 205	Shellsol D70
Плотность при 15°C	кг/м ³	ASTM D 4052	820	0,796
Вязкость при 20°C	мм ² /с	ASTM D 445	2,4	–
Вязкость при 25°C			–	2,0
Вязкость при 40°C			1,7	–
Температура вспышки	°C	ASTM D 93	76	78
Содержание ароматических соединений	ppm (x10 ⁻⁴ % масс.)	SMS 2728	–	<200
UV		–	40	–

Примечание. UV – ультрафиолетовая спектроскопия, от англ. Ultraviolet Spectroscopy.

Избирательность меди по железу определяли путем измерения содержания железа в органической фазе и наложения этих величин на график зависимости от процента нагружения реагента медью (за основу берется максимальное насыщение экстрагента в точке 1:10).

Для получения изотермы реэкстракции выполнили четыре опыта. Данные для определения точек берутся из анализов тщательно смешанных различных объемов бедного электролита и максимально нагруженной органической фазы в делительных воронках (время тщательного смешивания – 3–5 мин). Содержание меди в реэкстрагирующем растворе (отработанном электролите) составило 32,4 г/дм³, серной кислоты – 170,7 г/дм³. Максимальное насыщение органической фазы медью составило 5,55 г/дм³.

Данные исходных растворов и результаты анализов представлены в табл. 3, 4.

Кривые экстракции построены на основании данных по содержанию меди в органической фазе (г/дм³) и меди в водной фазе (г/дм³)

– ось x) рис. 1 а. Изотерма реэкстракции построена на основании данных по меди в водной фазе, г/дм³, (ось y) и меди в органической фазе, г/дм³, (ось x) (рис. 1 б).

Для моделирования процесса экстракция–реэкстракция в закрытом цикле была использована программа компании «Solvay» – MinChem.

На основании полученных изотерм лабораторным методом была построена модель (рис. 2), а также диаграмма Маккабе-Тилле (рис. 3), при соотношении органической и водной фаз 1,1:1 в экстракции 4,5:1 в реэкстракции. Сводные данные приведены в табл. 5.

По данным табл. 5, при соотношении О/В – 1,1 извлечение меди при использовании экстрагента Acorga M5774 составило 96,18%, что является очень высоким показателем. Более высокого извлечения возможно достичь, увеличив соотношение О/В, но необходимо учесть, что нагрузка на экстрагент снизится, что приведет к повышенному трансферу железа химическим путем.

Таблица 3. Состав продуктивного раствора выщелачивания руды, г/дм³
Table 3. Composition of the pregnant solution of ore leaching, g/dm³

Cu	Si	H₂SO₄	Fe	Co	Pb	Ag
2,44	0,121	15,96	2,613	<0,01	<0,01	<0,01
Mo	Al	As	Ca	Zn	Sb	pH
<0,01	0,274	<0,01	0,01	0,0057	<0,01	1,85

Таблица 4. Результаты анализов растворов экстракции и реэкстракции
Table 4. Analysis results of extraction and stripping solutions

Объем, мл		Отношение О/В	Содержание, г/дм ³			
органическая фаза	водная фаза		органическая фаза		водная фаза	
			Cu	Fe (мг/дм ³)	Cu	Fe
Изотермы экстракции						
50	25	2:1	1,210	29,30	0,023	2,450
45	30	1,5:1	1,535	11,80	0,030	2,598
35	35	1:1	2,310	16,00	0,063	2,604
30	45	1:1,5	3,425	14,50	0,158	2,564
25	50	1:2	3,975	4,50	0,356	2,608
20	60	1:3	4,805	1,50	0,869	2,638
12	60	1:5	4,960	7,50	1,440	2,597
12	120	1:10	5,200	6,00	1,940	2,612
Изотермы реэкстракции						
60	10	6:1	2,390	–	54,60	–
60	15	4:1	2,205	–	50,90	–
50	25	2:1	1,820	–	43,40	–
25	50	1:2	1,480	–	36,10	–

Примечание. Отношение О/В – отношение объемов органической фазы к водной.

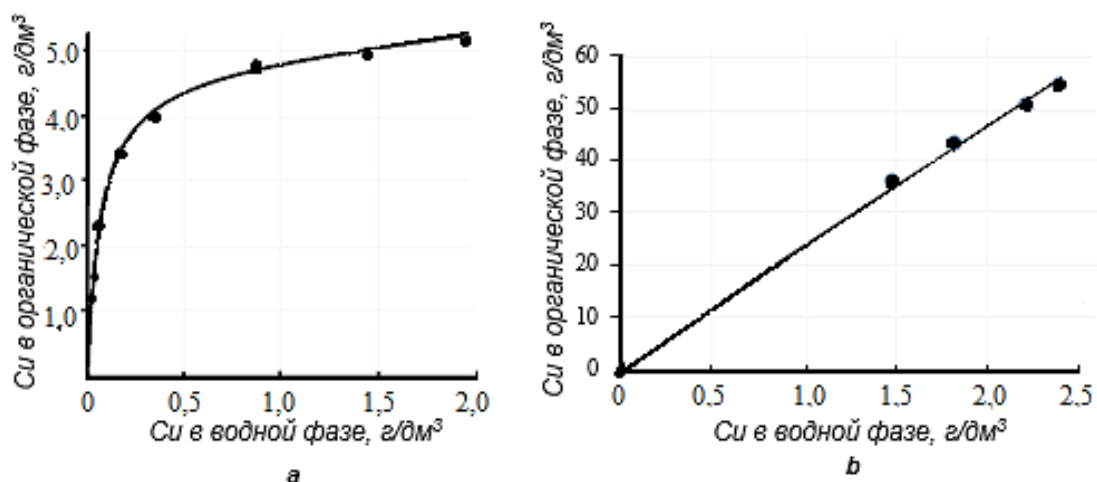


Рис. 1. Кривые экстракции (а) и реэкстракции (б) меди
 Fig. 1. Curves of copper extraction (a) and stripping (b)

Таблица 5. Свод параметров, извлечение и трансфер меди
 Table 5. Set of parameters, copper extraction and transfer

Схема	Соотношение О/В		Содержание меди, г/дм ³				Извлечение, %
	экстракция	реэкстракция	продуктивный раствор	отработанный электролит	электролит	рафинат E2	
2(Э)* + 1(Р)	1,1	4,5	2,44	35	44,6	0,093	96,18

Примечания: Э – экстракция; Р – реэкстракция.

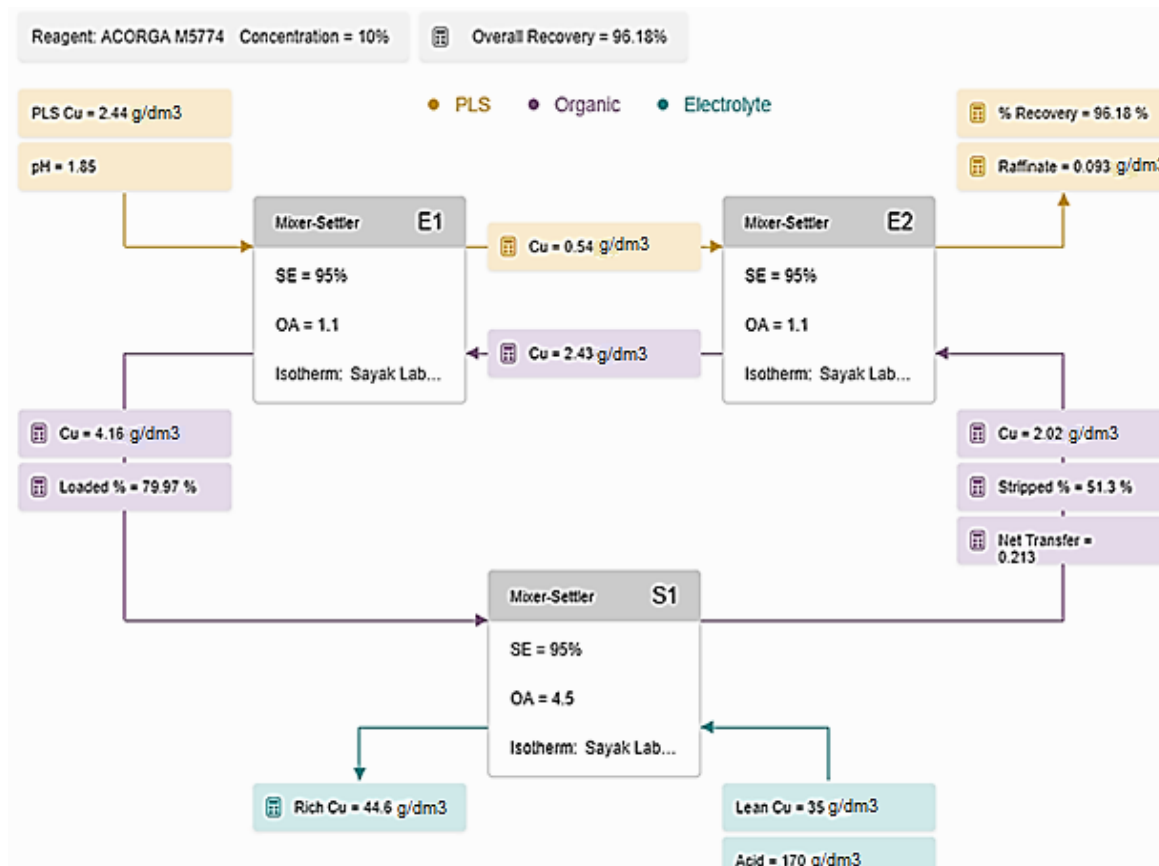


Рис. 2. Модель 2+1. Органическая фаза – ACORGA M5774 10%. Соотношение О/В – 1,1
 Fig. 2. Model 2+1. Organic phase – ACORGA M5774 10%. Organic/Water ratio – 1.1

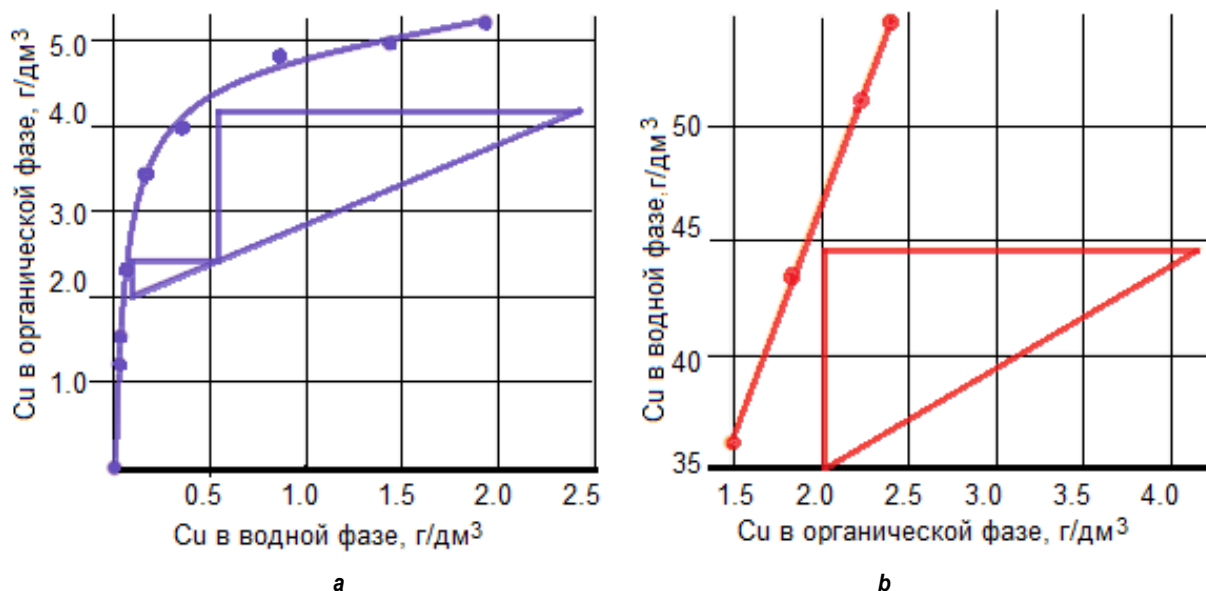


Рис. 3. Модель 2+1. Диаграмма Маккабе-Тилле: а – экстракция; б – реэкстракция
Fig. 3. Model 2+1. McCabe-Thiele diagram: a – extraction; b – stripping

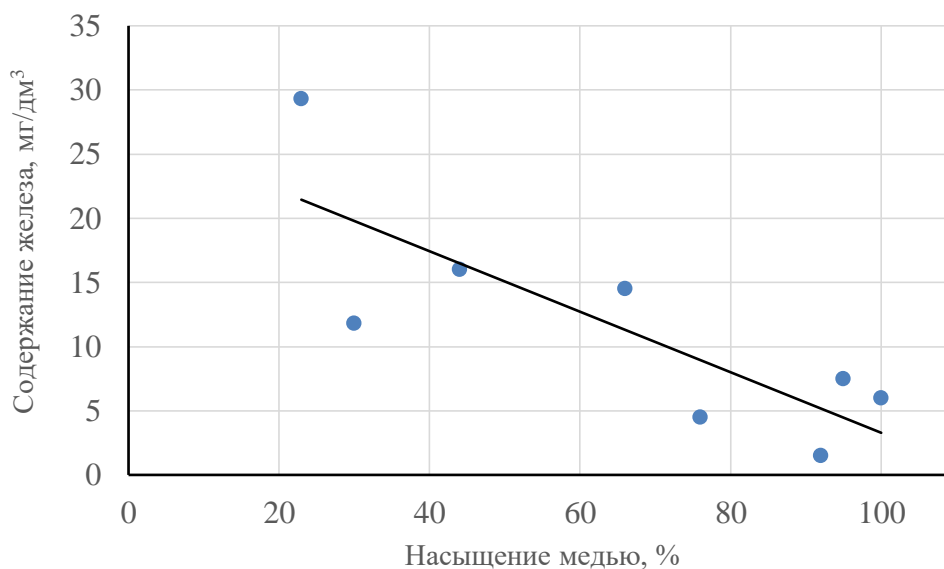


Рис. 4. Зависимость переноса железа от насыщения медью органической фазы
Fig. 4. Dependence of iron transfer on the copper loading of the organic phase

Селективность Cu:Fe является основным параметром в выборе экстрагента. Известно, что железо переходит из растворов PLS в электролиты, соответственно, очень важно создать все условия в стадиях экстракции для снижения переноса. Для этого необходимо максимально насыщать органическую фазу медью, а также использовать селективный экстрагент. Если железо в электролитах превышает допустимую концентрацию (2,5–3

г/дм³), то необходимо обновлять часть электролита, тем самым нести потери по сульфату кобальта, а также остальных добавок, которые дозируются в электролит.

Согласно проведенным тестам, построена зависимость концентрации железа в органической фазе от насыщения органической фазы медью (рис. 4).

Из рис. 4 следует, что перенос железа зависит от насыщения органической фазы ме-

дью. Если насыщенность медью в органической фазе низкая, тогда остальная часть экстрагента будет поглощать железо⁸.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований с использованием экстрагента Acorga M5774 и разбавителя Elixore 205 построены изотермы экстракции и рекстракции меди. Построена модель процесса жидкостной экстракции с использованием данных изотерм. При этом извлечение меди составило 96,18% (при соотношении О/В – 1,1), с нагрузкой на реагент 79%.

Согласно полученным изотермам экстракции, построена зависимость трансфера железа с органической фазой от насыщения органической фазы медью. По этим данным насыщение на реагент в 79% перенос железа составляет всего несколько мг/дм³. Для отмывания железа от органической фазы применяется специальная стадия, если в продуктивных растворах содержание железа более 5–6 г/дм³. В противном случае высокоселективный экстрагент Acorga M5640 или Acorga M5774 легко справляется с задачей минимального переноса железа в электролит без стадии промывки.

Список источников

1. Алтушкин И. А., Череповицын А. Е., Король Ю. А. Практическая реализация механизма устойчивого развития в создании и становлении горно-металлургического холдинга медной отрасли России. М.: Из-во «Руда и Металлы», 2016. 227 с.
2. Селезнев А. И., Балинов С. В., Емельянов Ю. Е., Шкетова А. Е., Копылова Н. В. Оценка возможности извлечения меди и никеля из сульфидных продуктов методом кучного бактериального выщелачивания // Перспективы развития технологии переработки углеводородных, растительных и минеральных ресурсов: материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 24–25 апреля 2014 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. С. 13–14.
3. Мартиросян В. А., Лисовская Ю. О., Сасунцян М. Э. Комплексное минералогическое исследование медных и молибденовых шлаков действующих металлургических заводов Армении // Вестник государственного инженерного университета Армении (политехник). Серия: Химические и природоохранные технологии. Архив 2014. Вып. 17. № 1. С. 86–95.
4. Ritcey G. M., Ashbrook A. W. Solvent extraction: principles and applications to process metallurgy. Part I. Amsterdam: Elsevier, 1984. P. 172–206.
5. Меретуков М. А. Процессы жидкостной экстракции в цветной металлургии. М.: Изд-во «Металлургия», 1985. 222 с.
6. Меретуков М. А. Процессы жидкостной экстракции и ионообменной сорбции в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1978. 120 с.
7. Гиндин Л. М. Экстракционные процессы и их применение. М.: Изд-во «Наука», 1984. 144 с.
8. Травкин В. Ф., Заставный А. М. Экстракционные и сорбционные методы переработки окисленных медных руд. М.: Изд-во ЦНИИЦветмет экономики и ин-формации, 1980. 47 с.
9. Трейбал Р. Жидкостная экстракция / пер. с англ. М.: Изд-во «Химия», 1966. 724 с.
10. Хансон К. Последние достижения в области жидкостной экстракции / пер. с англ. М.: Изд-во «Химия», 1974. 448 с.
11. Коренман И. М. Экстракция в анализе органических веществ. М.: Изд-во «Химия», 1977. 200 с.
12. Dreisinger D. B. Copper leaching from primary sulfides: Options for biological and chemical extraction of copper // Hydrometallurgy. 2006. Vol. 83. Iss. 1. P. 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.032>.
13. Rodrigues L. E. O. C., Mansur M. B. Hydrometallurgical separation of rare earth elements, cobalt and nickel from spent nickel–metal–hydride batteries // Journal of Power Sources. 2010. Vol. 195. Iss. 11. P. 3735–3741. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.071>.
14. Xia Yun, Xiao Liansheng, Tian Jiying, Li Zhaoyang, Li Zeng. Recovery of rare earths from acid leach solutions of spent nickel-metal hydride batteries using solvent extraction // Journal of Rare Earths. 2015. Vol. 33. Iss. 12. P. 1348–1354. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(14\)60568-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(14)60568-8).
15. Вольдман Г. М. Основы экстракционных и ионообменных процессов гидрометаллургии. М.: Изд-во «Металлургия», 1982. 376 с.
16. Barnard K. R., Kelly N. J. Effect of long term exposure of aliphatic ELIXORE 205 diluent to acidic and oxidising conditions on copper extraction // Hydrometallurgy. 2017. Vol. 169. P. 362–371. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.02.025>.
17. Reddy B. R., Priya D. N. Solvent Extraction of Ni(II) from Sulfate Solutions with LIX 841: Flow-Sheet for the Separation of Cu(II), Ni(II) and Zn(II) // Analytical Sciences. 2004. Vol. 20. Iss. 12. P. 1737–1740.

⁸Захарьян С. В. Исследование и разработка гидрометаллургической технологии переработки бедного медно-сульфидного сырья Жезказганского региона с извлечением меди и сопутствующих ценных компонентов сорбционным методом: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.02. Екатеринбург; Караганда, 2019. 362 с.

<https://doi.org/10.2116/ANALSCI.20.1737>.

18. Campderrós M. E., Acosta A., Marchese J. Selective separation of copper with Lix 864 in a hollow fiber module. 1998. Vol. 47. Iss. 1. P. 19–24. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(98\)00048-4](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(98)00048-4).

19. Каримова Л. М., Кан Д. Л., Кайралапов Е. Т. Изучение влияния природы разбавителей в экстракционной переработке раствора выщелачивания руды месторождения Нурказган Северного участка // Современные технологии производства цветных металлов: ма-

тер. Междунар. науч. конф., посвященной 80-летию С. С. Набойченко (г. Екатеринбург, 24–25 марта 2022 г.). Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2022. С. 93–98.

20. Cheng C. Y., Hughes C. A., Barnard K. R., Larcombe K. Manganese in copper solvent extraction and electrowinning // *Hydrometallurgy*. 2000. Vol. 58. Iss. 2. P. 135–150. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00120-1](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00120-1).

21. Золотов Ю. А., Кузьмин Н. М. Экстракционное концентрирование. Л.: Изд-во «Химия», 1971. 272 с.

References

1. Altushkin I. A., Cherepovicyan A. E., Korol' Yu. A. *Practical implementation of the sustainable development mechanism in the creation and development of a mining and metallurgical holding of the copper industry in Russia*. Moscow: Ruda i Metally; 2016, 227 p. (In Russ.).

2. Seleznev A. I., Balinov S. V., Emel'yanov Yu. E., Shketova A. E., Kopylova N. V. Evaluation of the recovery possibility of copper and nickel from sulfide products by heap bacterial leaching. In: *Perspektivy razvitiya tekhnologii pererabotki uglevodorodnyh, rastitel'nyh i mineral'nyh resursov: materialy IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Development prospects of the processing technology of hydrocarbon, plant and mineral resources: materials of the 4th All-Russian scientific and practical conference with international participation*. 24–25 April 2014, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2014, p. 13-14. (In Russ.).

3. Martirosyan V. A., Lisovskaya Yu. O., Sasuntsyan M. E. A complex mineralogical investigation of copper and molybdenum slags in the functioning metallurgical plants of Armenia. *Vestnik gosudarstvennogo inzhener'nogo universiteta Armenii (politehnik). Seriya: Himicheskie i prirodohrannye tekhnologii = Proceedings of State Engineering University of Armenia. Series: Chemical and environmental technologies*. 2014;17-1:86-95.

4. Ritcey G. M., Ashbrook A. W. *Solvent extraction: principles and applications to process metallurgy*. Part I. Amsterdam: Elsevier; 1984, p. 172-206.

5. Meretukov M. A. *Liquid extraction processes in non-ferrous metallurgy*. Moscow: Metallurgiya; 1985, 222 p. (In Russ.).

6. Meretukov M. A. *Liquid extraction processes and an ion-exchange sorption in non-ferrous metallurgy*. Moscow: Metallurgiya; 1978, 120 p. (In Russ.).

7. Gindin L. M. *Extraction processes and their application*. Moscow: Nauka; 1984, 144 p. (In Russ.).

8. Travkin V. F., Zastavny A. M. *Extraction and sorption processing methods of oxidized copper ores*. Moscow: Tsnii Svetmet Economics and Information; 1980, 47 p. (In Russ.).

9. Treybal R. Liquid extraction, 1966, 724 p. (Russ. ed.: *Zhidkostnaya ekstrakciya*. Moscow, Himiya; 1966, 724 p.)

10. Hanson K. Recent advances in liquid extraction, 1974. 448 p. (Russ. ed.: *Poslednie dostizheniya v oblasti zhidkostnoj ekstrakcii*. Moscow, Himiya; 1974, 448 p.)

11. Korenman I. M. *Extraction in the organic substance analysis*. Moscow, Himiya; 1977, 200 p. (In Russ.).

12. Dreisinger D. B. Copper leaching from primary sulfides: Options for biological and chemical extraction of copper. *Hydrometallurgy*. 2006;83(1):10-20. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.032>.

13. Rodrigues L. E. O. C., Mansur M. B. Hydrometallurgical separation of rare earth elements, cobalt and nickel from spent nickel-metal-hydride batteries. *Journal of Power Sources*. 2010;195(11):3735-3741. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.071>.

14. Xia Yun, Xiao Liansheng, Tian Jiyang, Li Zhaoyang, Li Zeng. Recovery of rare earths from acid leach solutions of spent nickel-metal hydride batteries using solvent extraction // *Journal of Rare Earths*. 2015;33(12):1348-1354. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(14\)60568-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(14)60568-8).

15. Vol'dman G. M. *Fundamentals of extraction and ion exchange processes in hydrometallurgy*. Moscow: Metallurgiya; 1982, 376 p. (In Russ.).

16. Barnard K. R., Kelly N. J. Effect of long term exposure of aliphatic ELIXORE 205 diluent to acidic and oxidising conditions on copper extraction. *Hydrometallurgy*. 2017;169:362-371. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.02.025>.

17. Reddy B. R., Priya D. N. Solvent extraction of Ni(II) from sulfate solutions with LIX 841: flow-sheet for the separation of Cu(II), Ni(II) and Zn(II). *Analytical Sciences*. 2004;20(12):1737-1740. <https://doi.org/10.2116/ANALSCI.20.1737>.

18. Campderrós M. E., Acosta A., Marchese J. Selective separation of copper with Lix 864 in a hollow fiber module. 1998;47(1):19-24. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(98\)00048-4](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(98)00048-4).

19. Karimova L. M., Kan D. L., Kajralapov E. T. Studying the effect of the diluter nature in the leaching solution extraction processing of the ore from the Nurkazgan deposit of the Northern section. In: *Sovremennye tekhnologii proizvodstva cvetnyh metallov: materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 80-letiyu S. S. Naboichenko = Modern production technologies of non-ferrous metals: materials of the International scientific conference dedicated to the 80th anniversary of S.S. Naboichenko*. 24–25 March 2022, Ekaterinburg. Ekaterinburg: 2022, p. 93-98. (In Russ.).

20. Cheng C. Y., Hughes C. A., Barnard K. R., Larcombe K. Manganese in copper solvent extraction and electrowinning. *Hydrometallurgy*. 2000;58(2):135-150. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00120-1](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00120-1).

21. Zolotov Yu. A., Kuz'min N. M. *Extraction concentration*. Leningrad: Himiya; 1971, 272 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каримова Люция Монировна,
доктор технических наук, доцент,
начальник Лаборатории металлургии,
ТОО «КазГидроМедь»,
100000, г. Караганда, ул. Московская, 4,
Республика Казахстан

Аргын Айдар,
докторант,
НАО "КазННТУ им. К. И. Сатпаева"
050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22,
Республика Казахстан

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.07.2022; одобрена после рецензирования 03.08.2022; принята к публикации 07.09.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lyutsiya M. Karimova,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Metallurgy Laboratory,
KazHydroMed LLP,
4, Moskovskaya St., Karaganda 100000,
Republic of Kazakhstan

Aidar Argyn,
Doctoral Student,
NCJS KazNRTU named after K.I. Satbayev,
22, Satbaev St., Almaty 050000,
Republic of Kazakhstan

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 01.07.2022; approved after reviewing 03.08.2022; accepted for publication 07.09.2022.



Научная статья
УДК 669.712:681.51
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-554-565>

Виртуализация трубчатого выщелачивателя при производстве глинозема

Андрей Алексеевич Тимофеев^{1✉}, Галина Борисовна Даныкина²,
Татьяна Валериевна Пискажова³, Людмила Петровна Колмакова⁴

¹⁻⁴Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

¹aktum600@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8703-7989>

²danykinagb-sfu@mail.ru

³piskazhova@yandex.ru

⁴kolmakoval2010@mail.ru

Резюме. Цель – разработка цифрового двойника трубчатого выщелачивателя с программой автоматического расчета качества алюминатного раствора на основе материального баланса для улучшения качества управления процессами гидрохимии на глиноземном комбинате АО «РУСАЛ Ачинск». Визуализация мнемосхемы процесса выщелачивания нефелинового спека выполнена с помощью программного комплекса Wonderware InTouch. Созданы Quick-сценарии для отображения анимации процесса. В качестве входных параметров были приняты температура раствора, расходы спека и оборотного раствора, химический состав сырья. В качестве основных возмущающих воздействий использовали температуру воздуха, вибрации и неисправность оборудования. Выходными параметрами приняты: выходы шлама и алюминатного раствора, потребляемая приводом мощность и кремниевый модуль получаемого раствора. С помощью производственных лабораторных данных сведен материальный баланс спека и оборотного раствора, на его основе разработаны алгоритм моделирования изменений в процессе выщелачивания и программа расчета качества алюминатного раствора с помощью встроенных в InTouch возможностей создания скриптов на собственном языке программирования. Разработан виртуальный двойник трубчатого выщелачивателя на основе действующего аппарата, используемого в АО «РУСАЛ Ачинск». Показано, что программа на основе простой балансовой модели предсказывает качество выходного продукта (алюминатного раствора) при изменении состава сырья (спека и оборотного раствора) и изменении скорости подачи в аппарат сырьевых материалов и отображает результаты расчетов с помощью мнемосхемы процесса. Таким образом, разработанный интерфейс позволяет имитировать различные технологические операции, производимые в трубчатом выщелачивателе: слив раствора, сброс шлама, изменение входных потоков; при этом возможно наблюдать как текущие изменения параметров процесса, так и архивные графики, а также подбирать оптимальный состав сырья для получения алюминатного раствора лучшего качества.

Ключевые слова: трубчатый выщелачиватель, алюминатный раствор, глинозем, виртуальный двойник, материальный баланс, спек

Для цитирования: Тимофеев А. А., Даныкина Г. Б., Пискажова Т. В., Колмакова Л. П. Виртуализация трубчатого выщелачивателя при производстве глинозема // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 554–565. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-554-565>.

Original article

Virtualization of a tube digester in alumina production

Andrey A. Timofeev^{1✉}, Galina B. Danykina²,
Tatiana V. Piskazhova³, Lyudmila P. Kolmakova⁴

¹⁻⁴Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

¹aktum600@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8703-7989>

²danykinagb-sfu@mail.ru

³ piskazhova@yandex.ru

⁴ kolmakoval2010@mail.ru

Abstract. In this work, we develop a digital twin of a tube digester and a software application automatically calculating the aluminate solution quality based on mass balance equations with the purpose of improving the quality of hydrochemical process management at the Rusal Achinsk JSC alumina plant. A mimic diagram of the nepheline sinter leaching process was visualized using the Wonderware InTouch software package. Quick scripts were created to display the process animation. The input parameters include the solution temperature, the consumption of sinter and recycled solution, as well as the chemical composition of raw materials. The air temperature, vibrations and equipment malfunction were used as the main disturbing effects. Output parameters consisted of sludge and aluminate solution yields, power consumed by the drive and the silicon ratio of the resulting solution. Based on the mass balance of sinter and recycled solution, calculated using industrial laboratory data, an algorithm for modelling variations in the digestion process and a software application for calculating the quality of aluminate solution were developed using the InTouch built-in capabilities of scripting in its own programming language. A digital twin of a tube digester was developed on the basis of an operating unit utilized at the Rusal Achinsk JSC. It was shown that the developed software application predicts the quality of the finished product (aluminate solution) using a simple balance model under variations in both the composition of raw materials (cake and recycling solution) and the rate of fed raw materials, as well as present the results of calculations performed using a mimic diagram of the process. Thus, the developed interface can be used to simulate various technological operations performed in a tube digester, including solution drainage, sludge discharge and variations in the inlet flows. At the same time, it becomes possible both to observe current changes in process parameters and archive plots, as well as to select the optimal composition of raw materials to obtain an aluminate solution of higher quality.

Keywords: tube digester, aluminate solution, alumina, virtual twin, material balance, sinter

For citation: Timofeev A. A., Danykina G. B., Piskazhova T. V., Kolmakova L. P. Virtualization of a tube digester in alumina production. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):554-565. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-554-565>.

ВВЕДЕНИЕ

Для получения глинозема в России используется нефелиновая руда, добываемая на Кия-Шалтырском месторождении Кемеровской области.

Технологическая цепочка является достаточно сложной и разветвленной. Наиболее распространенными считаются основные операции до поступления в цех гидрохимии: перемалывание руды с добавлением известняка и водных растворов, затем спекание полученного продукта во вращающихся высокотемпературных печах. Далее измельчен-

ный спек отправляется в цех гидрохимии, где первой операцией является выщелачивание.

Как известно, целью выщелачивания является перевод в раствор целевого компонента (глинозема в виде алюмината натрия). Выщелачивание нефелинового спека на комбинате осуществляется по проточному и агитационному типам. Одна из стадий проточного выщелачивания проводится в трубчатом выщелачивателе⁵ [1, 2] (рис. 1).

Со стороны загрузочной части в трубчатый выщелачиватель подается измельченный спек за первый виток спирали в нижнем конце

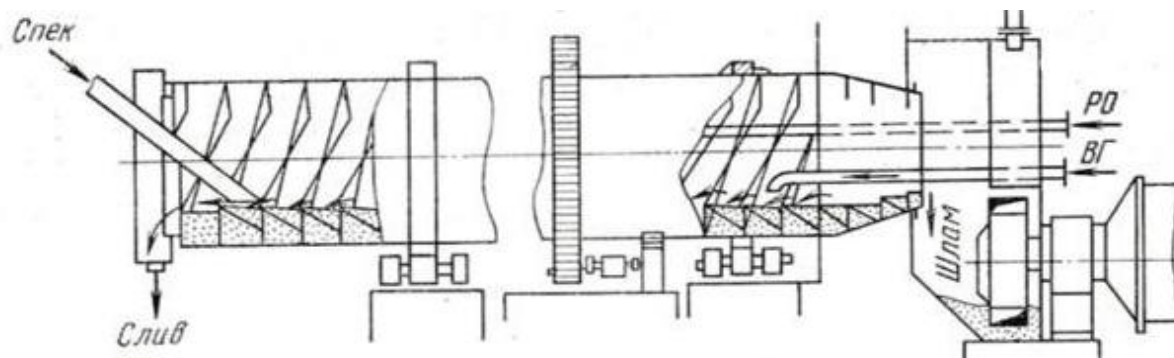


Рис. 1. Трубчатый выщелачиватель
Fig. 1. Tube digester

⁵ Лайнер А. И., Еремин Н. И., Лайнер Ю. А., Певзнер И. З. Производство глинозема: учеб. пособ. М.: Изд-во «Металлургия», 1978. 344 с.

аппарата, и за счет вращения спек перемещается в верхний разгрузочный конец аппарата.

Со стороны разгрузочной части в аппарат подается оборотный раствор (смесь содощелочного раствора и промывды, слива головных сгустителей основной нитки промывки шлама), который за счет наклона аппарата движется навстречу спеку, обогащается растворенными алюминатами натрия, калия и сливается из аппарата. Для улучшения контакта раствора и спека в спиралях вырезаны отверстия [3].

Выходным продуктом аппарата является крепкий алюминатный раствор, заданная концентрация оксида алюминия в алюминатном растворе поддерживается изменением расхода оборотного раствора в сам аппарат. Качество работы аппарата определяется кремниевым модулем (параметр, численно равный отношению Al_2O_3/SiO_2), который в алюминатном растворе поддерживается трансформацией расхода содощелочного раствора и составом входного сырья.

Нашей задачей является предсказание качества выходного продукта при изменении состава сырья и регулировке скорости подачи в аппарат спека оборотной воды. Для этого авторами статьи разработана и реализована в виде мнемосхемы простая балансовая модель трубчатого выщелачивателя.

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАТЕЛЯ

Цифровые двойники – технология, создаваемая с целью упростить и усовершенствовать работу физических прототипов изделий или производственного оборудования, целых систем и отдельных процессов [4–6].

Это компьютерная программа, которая содержит как архив и текущие значения технологических параметров, данные о конструкции аппарата, так и математические модели процессов, протекающих в аппарате. Программа создается специально для определенных целей компании-производителя, например, предсказать технические сбои, снизить затраты на обслуживание, предотвратить незапланированные отключения [7]. Виртуальный двойник – это часть цифрового двойника, а именно – математическая модель и интерфейс для воспроизведения результатов расчетов и ввода заданий пользователя.

В металлургии уже имеется опыт создания и использования виртуальных двойников аппаратов [8–11], в том числе в управляющих системах, но при получении глинозема таких работ нами не найдено.

Анализ процессов, протекающих в выщелачивателе (рис. 2), позволяет рассмотреть аппарат как объект управления (рис. 1) и выделить основные входные и возмущающие воздействия, выходные параметры (табл. 1).



Рис. 2. Трубчатый выщелачиватель как объект управления
Fig. 2. Tube digester as a control object

Таблица 1. Анализ параметров в трубчатом выщелачивателе
 Table 1. Parameter analysis in the tube digester

Показатели	Обозначение	Нормативные параметры	Единицы измерения
Входные параметры			
Расход спека в аппарат	$q_{\text{спека}}$	0–160	т/ч
Расход оборотного раствора	$q_{\text{ро}}$	0–400	м ³ /ч
Температура раствора	$t_{\text{ро}}$	0–150	°С
Химический состав спека	$h_{\text{спека}}$	–	–
Химический состав оборотного раствора	$h_{\text{р-ра}}$	–	–
Возмущающие воздействия			
Температура воздуха	$t_{\text{возд}}$	18-25	°С
Вибрации	s	–	м
Неисправность оборудования	–	–	–
Выходные параметры			
Выход шлама	$q_{\text{ш}}$	0–160	т/ч
Выход алюминатного раствора	$q_{\text{ра}}$	0–160	м ³ /ч
Мощность, потребляемая приводом	P	132	кВт
Кремниевый модуль в алюминатном растворе	δ_k	1–100	–

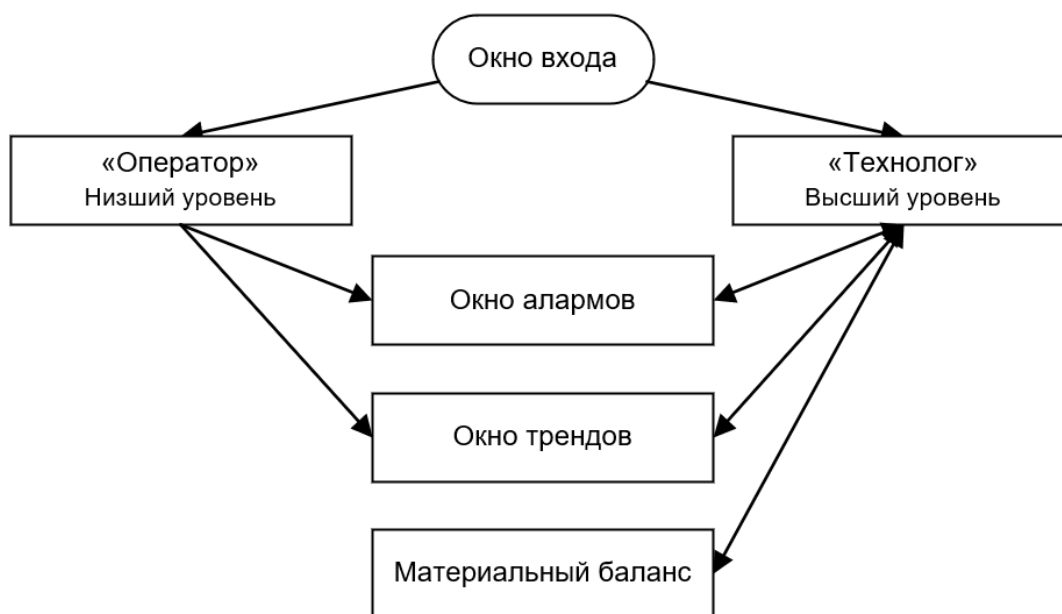


Рис. 3. Иерархия графических окон
 Fig. 3. Graphic window hierarchy

Для разработки мнемосхемы используется SCADA-система Wonderware InTouch⁶ [12–14], состоящая из различных окон, в которых отображаются графические и текстовые объекты, графики, кнопки и тумблеры для ввода информации и управления. Созданы Quick-

сценарии для отображения анимации процесса. Во время работы с системой учитывается разграничение доступа. Иерархия графических окон представлена на рис. 3.

С высшим уровнем доступа пользователь попадает в графическое окно «Технолог»

⁶AVEVA InTouch HMI (Wonderware InTouch HMI) Программное обеспечение HMI/SCADA Wonderware. [Электронный ресурс]. URL: <https://wonderware.ru/hmi-scada/> (8.02.2022).

(рис. 4), на данном рисунке видим то, в чем и состоит визуализация и имитация процесса.

В верхней части графического окна предусмотрены:

- отображение параметров процесса с показаниями средств измерений;
- индикация состояний элементов системы управления;
- компоненты с возможностью изменения количества поданного сырья;
- возможность перехода в окно авторизации;
- переключение режимов управления;

- подтверждение алармов;
- окно реального времени.

В правой части окна имеется возможность:

- вызова всплывающих графических окон трендов и алармов;
- вызова блока материального баланса для редактирования компонентов сырья.

С низшим уровнем доступа пользователь попадает в графическое окно «Оператор» (рис. 5), где предусматриваются более ограниченные возможности в сравнении с предыдущим пользователем.

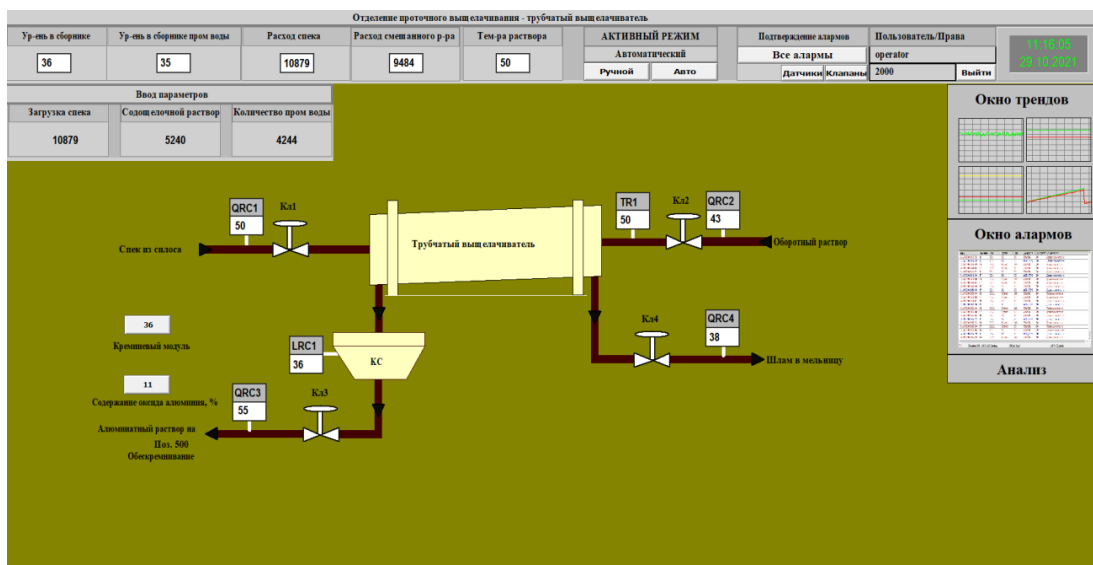


Рис. 4. Окно мнемосхемы с высшим уровнем доступа
Fig. 4. Window of the mnemonic diagram with the highest access level

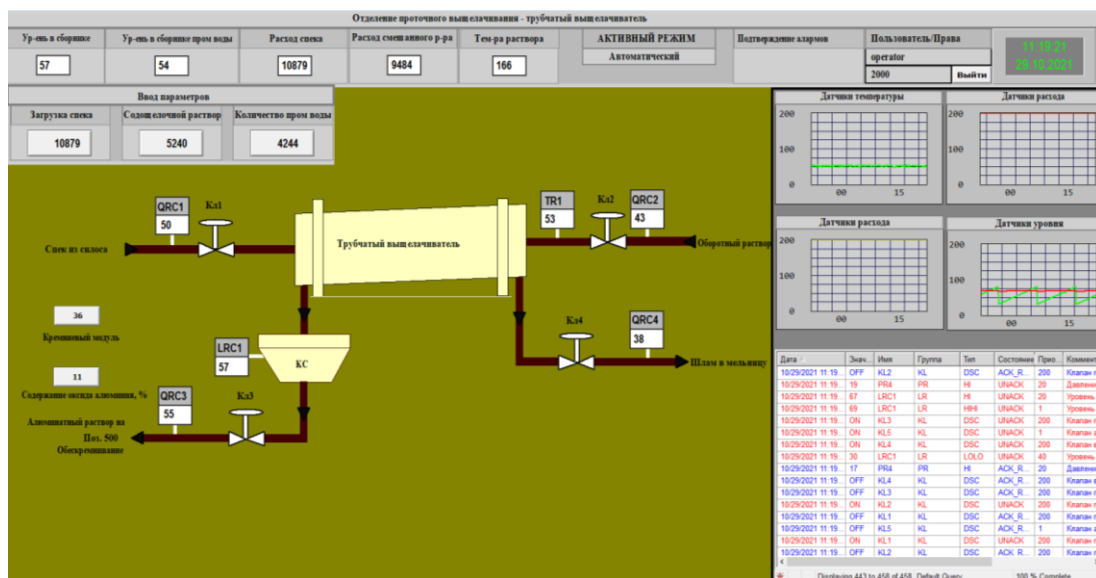


Рис. 5. Окно мнемосхемы с низшим уровнем доступа
Fig. 5. Window of the mnemonic diagram with the lowest access level

В верхней части графического окна предусмотрены:

- отображение параметров процесса с показаниями средств измерений;
- индикация состояний элементов системы управления;
- отображение количества поданного сырья;
- возможность перехода в окно авторизации;
- отображение текущего режима управления;
- окно реального времени.

В правой части окна отображаются графические окна трендов и алармов.

На всех уровнях доступа изображена модель трубчатого выщелачивателя. При имитации процесса возможно изменить:

- количество подаваемого спека (QRC1), т/ч;
- количество подаваемого оборотного раствора (QRC2), т/ч;
- сброс шлама (QRC4), т/ч.

Слева от объекта управления показана

оценка качества получаемого продукта (кремниевый модуль и содержание оксида алюминия) в зависимости от внесенных пользователем изменений в состав сырья и количества поданных спека и воды.

Алармы являются предупреждениями об аварийных условиях протекания процесса, которые могут вызвать проблемы и требуют отклика (подтверждения) оператора.

Окно алармов (рис. 6) содержит кнопки подтверждения алармов.

Графики трендов показывают изменение параметров технологического процесса в режиме реального времени. Предыдущие значения переменных также запоминаются, предусматривая возможность изучения предшествующих значений.

Моделирование материального баланса. Для имитации параметров выщелачивателя составлена таблица материального баланса процесса на 1000 кг глинозема.

Исходные данные для материального баланса выщелачивания спека представлены в табл. 2 и 3 [15].

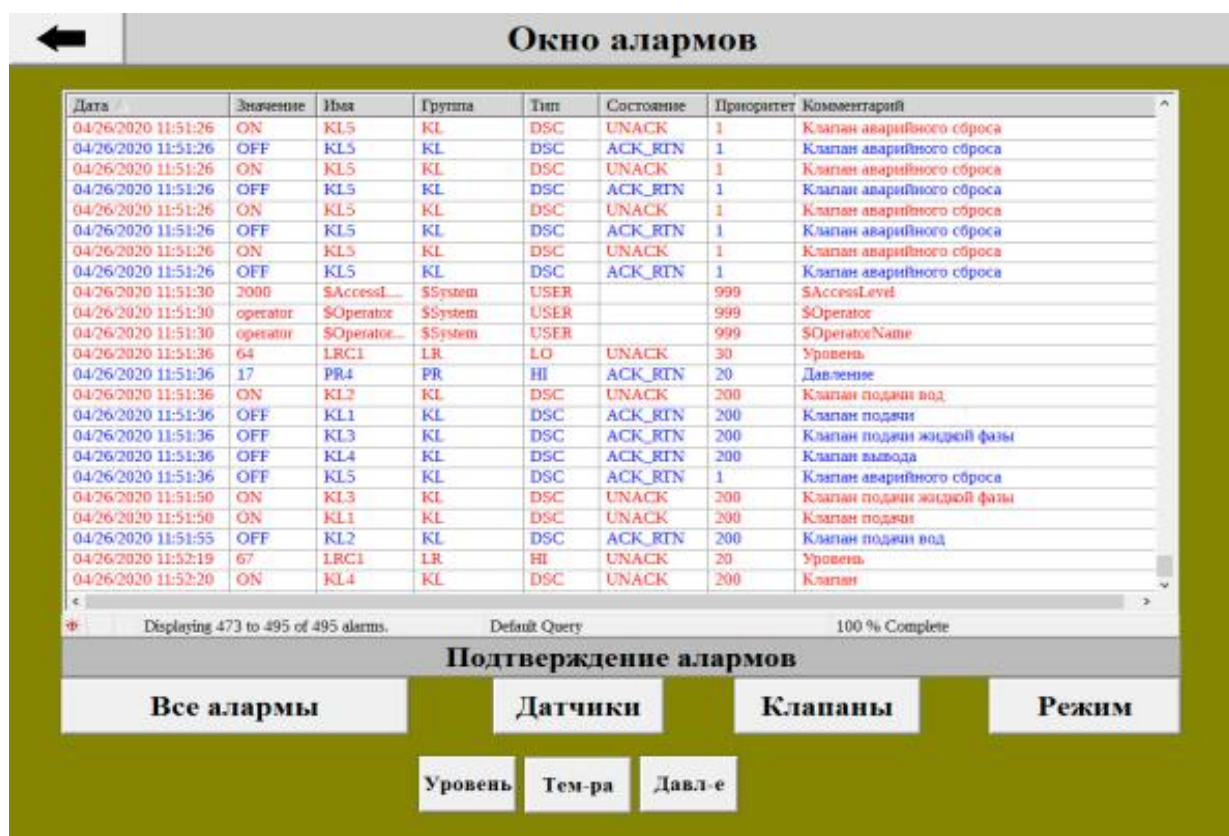


Рис. 6. Окно алармов
 Fig. 6. Alert window

Таблица 2. Химический состав спека
Table 2. Chemical composition of sintered mass

Компоненты	Содержание, кг
Al ₂ O ₃	1 626,06
R ₂ O	1 379,17
CaO	3 290,63
SiO ₂	1 762,94
Fe ₂ O ₃	278,04
MgO	51,71
Прочие	2 490,90

Спек выщелачивается оборотным раствором, который приготавливают из содощелочного раствора и промывной воды.

Таблица 3. Химический состав растворов
Table 3. Chemical composition of solutions

Растворы	Содержание, г/дм ³			Каустический модуль α_k	Плотность, кг/м ³
	Al ₂ O ₃	R ₂ O _k	R ₂ O _y		
Содощелочной раствор	26,69	50,41	45,59	содощелочной раствор	26,69
Промывная вода	42,95	42,58	5,70	промывная вода	42,95
Оборотный раствор	33,00	45,34	19,76	оборотный раствор	33,00

Таблица 4. Материальный баланс выщелачивания спека
Table 4. Material balance of sinter leaching

Наименование	Компоненты, кг									Итого
	Al ₂ O ₃	R ₂ O _k	R ₂ O _y	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	прочие	H ₂ O	
Приход										
Спек	1626,1	1379,2	0,0	3290,6	1762,9	278,1	51,7	2490,9	0,0	10879,4
Промывная вода	167,1	165,6	22,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3889,1	4244,0
Содощелочной раствор	125,6	235,4	212,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4665,8	5239,7
Смешанный	292,7	401,1	235,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8554,9	9483,7
ИТОГО	1918,7	1780,2	235,1	3290,6	1762,9	278,1	51,7	2490,9	8554,9	20363,2
Расход										
Алюминатный раствор	1713,8	1607,8	235,1	0,0	39,2	0,0	0,0	0,0	8554,9	12150,8
Шлам	204,9	172,4	0,0	3290,6	1723,8	278,1	51,7	2490,9	0,0	8212,3
ИТОГО	1918,7	1780,2	235,1	3290,6	1762,9	278,1	51,7	2490,9	8554,9	20363,2

Материальный баланс выщелачивания спека представлен в табл. 4⁷ [16, 17].

На основе предложенного материального баланса была создана программа, содержащая последовательность действий для автоматического выполнения расчета (рис. 7).

Программа расчета материального баланса работает по следующему алгоритму (рис. 8). Программа и алгоритм построены с учетом рекомендаций⁸ [18–20].

На основе программы расчета материального баланса был создан отдельный блок внутри SCADA-системы (рис. 9), с помощью которого можно изменять различные параметры сырья.

⁷Исаечкина А. А., Малашевская Е. А. Алгоритмика и программирование. Scratch, C++, Python // Перспективные средства организации инновационной проектной деятельности: сб. практ. реком. для педагогов. Комсомольск-на-Амуре: Изд-во МОУ «Инженерная школа города Комсомольска-на-Амуре», 2020. С. 91–110.

⁸Максимычев О. И., Либенко А. В., Виноградов В. А. Программирование логических контроллеров (PLC). М.: Изд-во МАДИ, 2016. 188 с.

Condition **While Running** Every **1000** Msec Scripts **2**

{Расчет суммы компонентов}

$$\text{Spek} = \text{SpekAl} + \text{SpekR20K} + \text{SpekR20U} + \text{SpekCAO} + \text{SpekSiO2} + \text{SpekFE23} + \text{SpekMGO} + \text{SpekPro} + \text{SpekH2O};$$
$$\text{Voda} = \text{VodaAl} + \text{VodaR20K} + \text{VodaR20U} + \text{VodaCAO} + \text{VodaSiO2} + \text{VodaFE23} + \text{VodaMGO} + \text{VodaPro} + \text{VodaH2O};$$
$$\text{Rastvor} = \text{RastvorAl} + \text{RastvorR20K} + \text{RastvorR20U} + \text{RastvorCAO} + \text{RastvorSiO2} + \text{RastvorFE23} + \text{RastvorMGO} + \text{RastvorPro} + \text{RastvorH2O};$$

{ Расчет извлечения оксида алюминия и R2O из спека при выщелачивании }

$$\text{Al2O3} = \text{SpekAl} * 0.874;$$
$$\text{R2O} = \text{SpekR20K} * 0.875;$$

{ Расчет количества красного шлама исходя из компонентов }

$$\text{Shlam} = [\text{SpekAl} - \text{Al2O3}] + [\text{SpekR20K} - \text{R2O}] + \text{SpekSiO2} + \text{SpekCAO} + \text{SpekFE23} + \text{SpekMGO} + \text{SpekPro};$$

{ Расчет количества алюминатного раствора исходя из компонентов }

$$\text{Aluminat} = [\text{Al2O3} + \text{VodaAl} + \text{RastvorAl}] + [\text{R2O} + \text{VodaR20K} + \text{RastvorR20K}] + [\text{VodaR20U} + \text{RastvorR20U}] + [\text{VodaH2O} + \text{RastvorH2O}];$$
$$\text{AluminatProc} = [\text{Al2O3} * 100] / [\text{Aluminat}];$$

{Расчет производительности тонн в час}

$$\text{RashSpeka} = [94 * \text{Spek}] / [\text{Spek} + \text{Voda} + \text{Rastvor}];$$
$$\text{RashVodaRastvor} = [94 * [\text{Voda} + \text{Rastvor}]] / [\text{Spek} + \text{Voda} + \text{Rastvor}];$$
$$\text{RashAluminat} = [94 * \text{Aluminat}] / [\text{Spek} + \text{Voda} + \text{Rastvor}];$$
$$\text{RashShlam} = [94 * \text{Shlam}] / [\text{Spek} + \text{Voda} + \text{Rastvor}];$$

{Качество Алюмината Кремниевый модуль}

$$\text{SiOModul} = \text{Al2O3} / [(\text{Aluminat} * 0.32) / 100] ;$$

IF ELSE AND < <= == <> >= >
THEN ELSE IF OR = + - * / ;
ENDIF NOT

OK
Cancel
Convert
Validate

Functions
All...
String...
Math...
System...
Add-ons...
Misc...
Quick...
Help...

Рис. 7. Скрипт расчета материального баланса
Fig. 7. Material balance calculation script

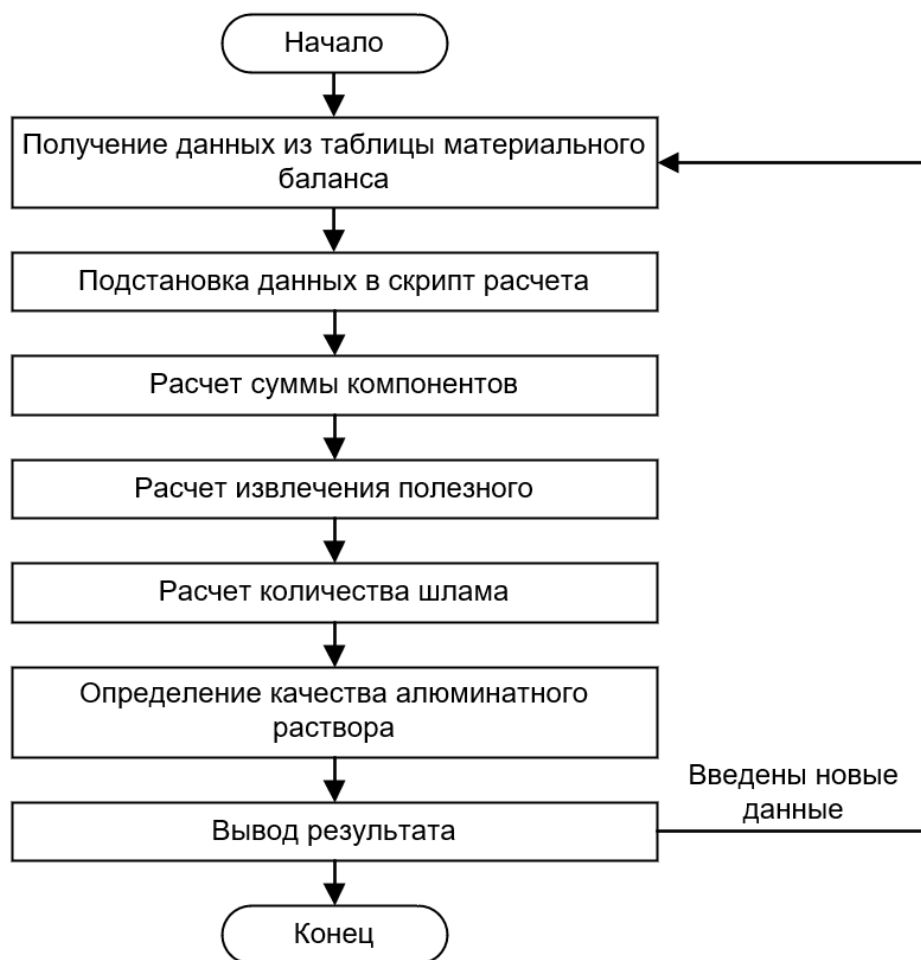


Рис. 8. Алгоритм работы скрипта расчета материального баланса
Fig. 8. Material balance calculation script algorithm

← Материальный баланс										
	Al ₂ O ₃	R ₂ O _к	R ₂ O _у	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Прочие	H ₂ O	Итого
Спек	1626	1379	0	3291	1763	278	52	2491	0	10879
Пром вода	167	166	22	0	0	0	0	0	3889	4244
Содошело-ч р-р	126	235	213	0	0	0	0	0	4666	5240

Рис. 9. Блок расчета материального баланса
Fig. 9. Material balance calculation unit

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На производстве не представляется возможным рассмотреть изменения каких-либо технологических параметров без снижения экономической эффективности и нарушения безопасности ведения процесса.

Для того чтобы производить эксперименты путем изменения параметров без вреда для производства, требуется виртуальный клон технологического процесса или объекта,

который хранит в себе свойства и возможности своего реального двойника.

Разработан виртуальный трубчатый выщелачиватель, позволяющий рассчитывать качество выходного продукта при разном составе сырья и имитировать изменение входных и выходных потоков, выдавать аварийные предупреждения, подбирать технологические регламенты для эффективного ведения процесса.

Список источников

1. Черкасова М. В., Бричкин В. Н. Современные тенденции в переработке низкокачественного алюминиевого сырья и их влияние на развитие минерально-сырьевой базы производства глинозема // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S1-4. С. 172–180.
2. Bagani M., Balomenos E., Pnias D. Nepheline syenite as an alternative source for aluminum production // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 7. P. 734. <https://doi.org/10.3390/min11070734>.
3. Моргунов В. В. Технология производства глинозема из бокситов // Международный студенческий научный вестник. 2019. № 6. С. 8. <https://doi.org/10.17513/msnv.19842>.
4. Абрамов В. И., Туйцына А. А. Цифровые двойники – эффективные инструменты цифровой трансформации компании // Управление бизнесом в цифровой экономике: сб. тез. конф. IV Междунар. конф. (г. Санкт-Петербург, 18–19 марта 2021 г.). СПб.: Изд-во СПбГУПТД, 2021. С. 33–39.
5. Боровков А. И., Рябов Ю. А. Определение, разработка и применение цифровых двойников: подход центра компетенций НТИ СПбПУ // Цифровая подстанция. 2019. [Электронный ресурс]. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2020/04/30/opredelenie-razrabotka-i-primenenie-tsifrovyyh-dvoynikov-podhod-tsentra-kompetentsij-nti-spbpu-novye-proizvodstvennye-tehnologii/> (17.02.2022).
6. Боровков А. И., Рябов Ю. А. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки // Цифровая трансформация экономики и промышленности: сб. тр. науч.-практ. конф. с зарубежным участием (г. Санкт-Петербург, 20–22 июня 2019 г.). СПб.: Изд-во СПбПУ им. Петра Великого, 2019. С. 234–245. <https://doi.org/10.18720/IEP/2019.3/25>.
7. Комраков А. В., Сухоруков А. И. Концепция цифрового двойника в управлении жизненным циклом промышленных объектов // Сетевой научный журнал «Научная идея». 2017. № 3. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nauch-idea.ru/index.php/nomer-3-3/10-3-3/47-kontseptsiya-tsifrovogo-dvojnika-v-upravlenii-zhiznennym-tsiklom-promyshlennykh-ob-ektov> (17.02.2022).
8. Пискажова Т. В., Сидельников С. Б., Белолипецкий В. М., Якив'юк П. Н., Сидельников А. С. «Виртуальный СЛиПП» математическая модель для управления агрегатом СЛиПП и ее визуализация с помощью программных продуктов WinCC 7. 0 и Step 7 // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2015. Т. 16. № 2. С. 140–144.
9. Пискажова Т. В. Программа – имитатор для поддержки принятия технологических решений при получении алюминия // Автоматизация в промышленности. 2010. № 7. С. 41–44.
10. Yurkov V. V., Mann V. Ch., Piskazhova T. V., Nikandrov K. F. Virtual aluminum reduction cell // Light Metals. 2001. P. 1259–1266.
11. Yakiv'yuk P. N., Piskazhova T. V., Belolipetskii V. M., Nesterov G. A. Virtual casting and rolling lines development // Mechanical and Automation Engineering for Industry 4.0: Materials Science and Engineering. IOP Conference Series. 2019. Vol. 537. Iss. 3. P. 032094. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032094>.
12. Корягин Н. Д., Сухоруков А. И., Медведев А. В. Реализация современных методологических подходов к менеджменту в информационных системах управления: монография. М.: РИО МГТУ ГА, 2015. 148 с.
13. Gupta B. K., Rastogi V. Integration of technology to access the manufacturing plant via remote access system - A part of Industry 4.0 // Selection and peer-review under responsibility of the scientific committee of the First International Conference on Design and Materials: Proceedings. 2021. Vol. 56. Part 6. P. 3497–3505. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.135>.
14. Бильфельд Н. В., Фелькер М. Н. Разработка технологических мнемосхем на языках высокого уровня // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2020. № 1. С. 65–68. <https://doi.org/10.17072/1993-0550-2020-1-65-68>.
15. Brial V., Tran Hang, Sorelli Luca, Conciatori David, Ouellet-Plamondon C. M. Evaluation of the reactivity of treated spent pot lining from primary aluminum production as cementitious materials // Resources, Conservation and Recycling. 2021. Vol. 170. P. 105584. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105584>.
16. Niero D. F., Montedo O. R. K., Bernardin A. M. Synthesis and characterization of nano α -alumina by an inorganic sol-gel method // Materials Science and Engineering: B. 2022. Vol. 280. P. 115690. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.115690>.
17. Mahecha-Rivas J. C., Fuentes-Ordoñez E., Epelde E., Saldarriaga J. F. Aluminum extraction from a metallurgical industry sludge and its application as adsorbent // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 310. P. 127374. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127374>.
18. Александров А. В., Немчинова Н. В. Роль полиморфных модификаций двухкальциевого силиката нефелиновых спеков при производстве глинозема // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 11. С. 170–183. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-11-170-183>.
19. Арлюк Б. И. Выщелачивание алюминатных спеков. М.: Изд-во «Металлургия», 1979. 80 с.
20. Романов А. А., Салтанаева Е. А. Алгоритмизация и программирование // Научные исследования XXI века. 2020. № 6. С. 111–114.

References

1. Cherkasova M. V., Brichkin V. N. Current trends in processing high quality aluminum materials and their influence on development of mineral resources base of alumina production. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2015;S1-4:172-180. (In Russ.).
2. Bagani M., Balomenos E., Pnias D. Nepheline syenite as an alternative source for aluminum production. *Minerals*. 2021;11(7):734. <https://doi.org/10.3390/min11070734>.
3. Morgunov V. V. Technology of alumina production from bauxite. *Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik*. 2019;6:8. <http://doi.org/10.17513/msnv.19842>. (In Russ.).
4. Abramov V. I., Tuysyna A. A. Digital twins as effective tools for the company digital transformation. *Upravlenie biznesom v cifrovoj ekonomike: sbornik tezisov konferencii IV Mezhdunarodnoj konferencii = Business management in digital economy: collected abstracts of the 4th International Conference*. 18–19 March 2021, St. Petersburg. St. Petersburg: Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 2021, p. 33-39. (In Russ.).
5. Borovkov A. I., Ryabov Yu. A. Identification, development and application of digital twins: the approach of the National Technological Initiative of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Competence Center. *Cifrovaya podstanciya*. 2019. Available from: <http://digitalsubstation.com/blog/2020/04/30/opredelenie-razrabotka-i-primenenie-tsifrovyyh-dvoynikov-podhod-tsentra-kompetentsij-nti-spbpu-novye-proizvodstvennye-tehnologii/> [Accessed 17th February 2022]. (In Russ.).
6. Borovkov A. I., Ryabov Yu. A. Digital twins: definition, approaches and methods of development. *Cifrovaya transformaciya ekonomiki i promyshlennosti: sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferencii s zarubezhnym uchastiem = Digital Transformation of Economy and Industry: Collected works of the scientific and practical conference with international participation*. 20–22 June 2019, St. Petersburg. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2019, p. 234-245. (In Russ.). <https://doi.org/10.18720/IEP/2019.3/25>.
7. Komrakov A. V., Sukhorukov A. I. The concept of digital twin in managing industrial capital construction and operation projects life cycle. *Setevoy nauchnyj zhurnal "Nauchnaya ideya"*. 2017;3. Available from: <http://www.nauch-idea.ru/index.php/nomer-3-3/10-3-3/47-kontseptsiya-tsifrovogo-dvoynika-v-upravlenii-zhiznennym-tsiklom-promyshlennykh-ob-ektov> [Accessed 17th February 2022]. (In Russ.).
8. Piskazhova T. V., Sidel'nikov S. B., Belolipeckij V. M., Yakiv'yuk P. N., Sidel'nikov A. S. "Virtual CC&RP" – a mathematical model for the control of the unit CC&RP and its visualization with the help of software products WinCC 7.0 and Step 7. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva*. 2015;16(2):140-144. (In Russ.).
9. Piskazhova T. V. A simulation program for technological decision support in aluminum production. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2010;7:41-44. (In Russ.).
10. Yurkov V. V., Mann V. Ch., Piskazhova T. V., Nikandrov K. F. Virtual aluminum reduction cell. *Light Metals*. 2001;1259-1266.
11. Yakiv'yuk P. N., Piskazhova T. V., Belolipetskii V. M., Nesterov G. A. Virtual casting and rolling lines development. In: *Mechanical and Automation Engineering for Industry 4.0: Materials Science and Engineering*. IOP Conference Series. 2019;537(3):032094. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032094>.
12. Koryagin N. D., Suhorukov A. I., Medvedev A. V. *Implementation of modern methodological approaches in information control system management*. Moscow: Editorial and Publications Division of Moscow State Technical University of Civil Aviation; 2015, 148 p. (In Russ.).
13. Gupta B. K., Rastogi V. Integration of technology to access the manufacturing plant via remote access system - A part of Industry 4.0. In: *Selection and peer-review under responsibility of the scientific committee of the First International Conference on Design and Materials: Proceedings*. 2021;56(6):3497-3505. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.135>.
14. Bilfeld N. V., Felker M. N. Development of technological mnemonic schemes in high-level programming languages. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Series: Mathematics. Mechanics. Computer Science*. 2020;1:65-68. <https://doi.org/10.17072/1993-0550-2020-1-65-68>.
15. Brial V., Tran Hang, Sorelli Luca, Conciatori David, Ouellet-Plamondon C. M. Evaluation of the reactivity of treated spent pot lining from primary aluminum production as cementitious materials. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021;170:105584. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105584>.
16. Niero D. F., Montedo O. R. K., Bernardin A. M. Synthesis and characterization of nano α -alumina by an inorganic sol-gel method. *Materials Science and Engineering: B*. 2022;280:115690. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.115690>.
17. Mahecha-Rivas J. C., Fuentes-Ordoñez E., Epelde E., Saldarriaga J. F. Aluminum extraction from a metallurgical industry sludge and its application as adsorbent. *Journal of Cleaner Production*. 2021;310:127374. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127374>.
18. Aleksandrov A. V., Nemchinova N. V. The role of sintered nepheline dicalcium silicate polymorphs in alumina production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;20(11):170-183. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-11-170-183>.
19. Arlyuk B. I. *Leaching of sintered aluminate cakes*. Moscow: Metallurgiya; 1979, 80 p. (In Russ.).
20. Romanov A. A., Saltanaeva E. A. Algorithmization and programming. *Nauchnye issledovaniya XXI veka*. 2020;6:111-114. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тимофеев Андрей Алексеевич,
магистрант,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 95,
Россия

Даныкина Галина Борисовна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автоматизации
производственных процессов в металлургии,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 95,
Россия

Пискажова Татьяна Валериевна,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры автоматизации
производственных процессов в металлургии,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 95,
Россия

Колмакова Людмила Петровна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 95,
Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 12.04.2022; одобрена после рецензирования 27.05.2022; принята к публикации 27.09.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey A. Timofeev,
Master's Degree Student,
Siberian Federal University,
95, gazety Krasnoyarskiy Rabochiy pr., Krasnoyarsk
660041, Russia

Galina B. Danykina,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Automation of
Production Processes in Metallurgy,
Siberian Federal University,
95, gazety Krasnoyarskiy Rabochiy pr., Krasnoyarsk
660041, Russia

Tatiana V. Piskazhova,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Automation of Production
Processes in Metallurgy,
Siberian Federal University.
95, gazety Krasnoyarskiy Rabochiy pr., Krasnoyarsk
660041, Russia

Lyudmila P. Kolmakova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Automation of
Production Processes in Metallurgy,
Siberian Federal University.
95, gazety Krasnoyarskiy Rabochiy pr., Krasnoyarsk
660041, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 12.04.2022; approved after reviewing 27.05.2022; accepted for publication 27.09.2022.

ПЕРСОНАЛИЯ

**Профессор Виктор Владимирович Ёлшин:
научный деятель, педагог**

Виктор Владимирович Ёлшин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и управления Иркутского национального исследовательского технического университета, 3 октября 2022 года отметит два Юбилея – 75-летие со дня рождения и 50-летие научно-педагогической деятельности.

PERSONALIA

Professor Viktor Vladimirovich Elshin: scientist, teacher

Viktor Elshin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automation and Control of the Irkutsk National Research Technical University celebrates two anniversaries on October 3, 2022: his 75th birth anniversary and the 50th anniversary of his scientific and pedagogical activity.



Свою трудовую деятельность после окончания Иркутского политеха в 1969 году В. В. Ёлшин начал в должности младшего научного сотрудника АО «Иргиредмет». С 1973 года работает в ИРНТУ (ИПИ). Прошел все ступени преподавательской деятельности – от ассистента до декана заочно-вечернего факультета. В настоящее время Виктор Владимирович возглавляет кафедру автоматизации и управления.

В 1981 году в Московском институте стали и сплавов В.В. Ёлшин защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование и разработка технологии автоклавной десорбции благородных металлов из активных углей и регенерации сорбентов». А в 2000 году успешно завершена работа над докторской диссертацией по теме «Теория и практика сорбционного извлечения благородных

металлов из растворов и пульп активными углями».

Научную и педагогическую деятельность профессор В. В. Ёлшин всегда сочетает с инновационной работой по заказам НИИ и золотодобывающих предприятий Урала, Сибири и Дальнего Востока, таких как Пластовская ЗИФ АО «ЮГК», АО «Иргиредмет», предприятий АО «Алданзолото» и др. Внедрение разработок ИРНТУ, выполненных под руководством профессора В. В. Ёлшина, только одному из предприятий ПГ «Южуралзолото» позволило получить чистой прибыли в объеме 12 млрд рублей. В. В. Ёлшин является научным руководителем коллектива-победителя конкурса проектов по Постановлению Правительства РФ № 218 от 09.04.2010 г., активно содействует сотрудничеству ИРНТУ с промышленными и добывающими предприятиями региона и России.

Профессор В. В. Ёлшин – участник многих научных конференций в России и за рубежом, автор более 50 патентов на изобретения и более 300 научных публикаций в отечественных и зарубежных журналах; является членом ученого Совета Института высоких технологий, членом диссертационных Советов по защитах кандидатских и докторских диссертаций при ИРНТУ и ИрГУПС, академиком Метрологической Академии РФ и членом-корреспондентом Академии естествознания РФ.

Под руководством В. В. Ёлшина подготовлены сотни специалистов в области автоматизации технологических процессов, защищены четыре кандидатских и одна докторская диссертации, создана научная школа в области математического моделирования, новых средств контроля и автоматизации энергоэффективной гидрометаллургии золотосодержащих руд.

Многолетняя научная, инновационная и педагогическая деятельность В. В. Ёлшина

отмечена многими наградами и почетными званиями, такими как Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Заслуженный работник науки и высшей школы Иркутской области; присвоением РАН почетного звания с вручением знака «Заслуженный деятель науки и образования РФ»; юбилейными медалями «В память 350-летия Иркутска» и «100-летие Вооруженным Силам России».

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: pgr@istu.edu в виде файла с расширением *.DOC – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с приложением файлов (**представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах**);
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

«iPolytech Journal» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «Кибер-Ленинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «iPolytech Journal», реферируются и рецензируются. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.
Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный секретарь.
Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: pgr@istu.edu

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

iPolytech Journal

Том 26, № 3. 2022 / Vol. 26, №3. 2022

16+



Редактор Я.В. Макшанцева
Дизайнер В.Г. Лисицин
Ответственный секретарь
Г.П. Привалова
Перевод на английский язык
Tomas A. Beavitt,
Н.Г. Попова, В.В. Батицкая
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 30.09.2022 г.
Формат 60x90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 27.
Тираж 500 экз. Заказ 115. 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, 83А